

19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 Offenlegungsschrift  
10 DE 197 04 496 A 1

51 Int. Cl.<sup>8</sup>:  
G 01 J 9/00  
// G 01 B 11/00, H 04 N  
3/15

21 Aktenzeichen: 197 04 496.4  
22 Anmeldetag: 7. 2. 97  
43 Offenlegungstag: 12. 3. 98

DE 197 04 496 A 1

66 Innere Priorität:  
196 35 932.5 05.09.96

71 Anmelder:  
Schwarte, Rudolf, Prof. Dr.-Ing., 57250 Netphen, DE

72 Erfinder:  
gleich Anmelder

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der Phasen- und/oder Amplitudeninformation einer elektromagnetischen Welle

57 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung der Phasen- und/oder Amplitudeninformation einer elektromagnetischen Welle, bei dem das technische Problem, ein einfacheres, breitbandigeres und preisgünstigeres Korrelatorkonzept und über eine vorgebbare Beleuchtung eine schnelle 3-D-Objektvermessung zu ermöglichen, bei dem eine elektromagnetische Welle auf die Oberfläche eines mindestens ein Pixel aufweisenden photonischen Mischelementes eingestrahlt wird, wobei das Pixel mindestens zwei lichtempfindliche Modulationsphotogates  $G_{am}$  und  $G_{bm}$  und zugeordnete Akkumulationsgates  $G_a$  und  $G_b$  aufweist, bei dem an die Modulationsphotogates  $G_{am}$  und  $G_{bm}$  Modulationsphotogatespannungen  $U_{am}(t) = U_0 + U_m(t)$  und  $U_{bm}(t) = U_0 - U_m(t)$  und an die Akkumulationsgates  $G_a$  und  $G_b$  eine Gleichspannung angelegt werden, bei dem die in der Raumladungszone der Modulationsphotogates  $G_{am}$  und  $G_{bm}$  von der einfallenden elektromagnetischen Welle erzeugten Ladungsträger in Abhängigkeit von der Polarität der Modulationsphotogatespannungen  $U_{am}(t)$  und  $U_{bm}(t)$  dem Potentialgefälle eines Driftfeldes ausgesetzt werden und zum entsprechenden Akkumulationsgate  $G_a$  oder  $G_b$  driften.

DE 197 04 496 A 1

Die folgenden Angaben sind dem Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 01.98 702 071/609

24/22

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung der Phasen- und Amplitudeninformation einer elektromagnetischen Welle.

Der Begriff Phase steht hier allgemein für Phasenlaufzeit und für die je nach Signalform ebenfalls verwendete Bezeichnung Laufzeit.

Im folgenden wird von einer Lichtwelle anstatt von einer elektromagnetischen Welle gesprochen. Dieses bedeutet jedoch keine Einschränkung nur auf den Spektralbereich der sichtbaren elektromagnetischen Wellen, sondern dient lediglich der Vereinfachung.

Zur Messung von Frequenzkomponenten nach Amplitude und Phase in breitbandigen und hochfrequenten Signalen werden in der elektronischen Meßtechnik und Nachrichtentechnik häufig Phasendetektoren eingesetzt, die das unbekannte Signal mit einer Sinusschwingung multiplizieren bzw. mischen und den Gleichanteil, der bei Vorliegen einer Signalkomponente gleicher Frequenz durch Integration bzw. Tiefpaßfilterung entsteht, bestimmen.

Dieser Prozeß erzeugt die Korrelationsfunktion des unbekannten Signals mit dem Mischsignal für eine bestimmte, einstellbare relative Phasenlage. Durch Ändern der Mischfrequenz (Wobbeln) kann das unbekannte Signal in seine Spektralanteile zerlegt werden. Durch mindestens 3 Phasenlagen der Mischfrequenz können Gleichanteil, Wechselamplitude und Phase der unbekannten Frequenzkomponente gleicher Frequenz bestimmt werden.

Die Untersuchung entsprechender optischer Signale, die eine wachsende Bedeutung in der Meßtechnik und Nachrichtentechnik erlangt haben, geschieht heute i.a. über breitbandige Photodetektoren als elektrooptische Wandler mit anschließender elektronischer Meßwertbestimmung — wie zuvor für elektrische Signale beschrieben.

Wegen des hohen Aufwandes werden diese Verfahren und die entsprechenden Meßgeräte meist nur ein- oder zweikanalig ausgeführt. Bei optischen Signalen sind jedoch häufig gleichzeitig sehr viele parallele Kanäle — insbesondere ganze Bildfolgen — mit hohen Frequenzanteilen zu vermessen.

Neben den spektralen Modulationseigenschaften von zweidimensionalen Lichtwellen interessiert zunehmend der schnelle Verlauf der Einhüllenden in Raum und Zeit. Außerdem möchte man schnell und genau 3D-Objekte z. B. über optische Radarverfahren vermessen, was infolge der Lichtgeschwindigkeit der Echosignale sehr schnelle Detektoren im Subnanosekundenbereich erfordert. Zugleich sollten sie als Detektorarray vorliegen, wenn man auf ein zeitraubendes Abscannen der aktiv oder passiv leuchtenden 3D-Objekte verzichten möchte.

In der Offenlegungsschrift DE 44 39 298 A1, von der die vorliegende Erfindung ausgeht, wird eine solche 3D-Kamera vorgeschlagen.

Fig. 10 soll zur Veranschaulichung dieser 3D-Kamera dienen, die auf dem Echolaufzeit- bzw. Phasenlaufzeitverfahren beruht. Die von einem modulierten Lichtsender 107 und 103 abgestrahlte und von dem 3D-Objekt 100 reflektierte HF-modulierte Lichtwelle 101 enthält die gesamte Tiefeninformation in der Verzögerung der Phasenfront. Wird die einfallende Lichtwelle in der Empfangsapertur 102 nochmals mit einem zweidimensionalen, optischen Mischer 104 der gleichen Frequenz moduliert, was einem homodynem Misch- oder Demodulationsprozeß entspricht, so entsteht ein stationäres Hochfrequenz-Interferogramm.

Dieses HF-Interferogramm kann mit einer konventionellen CCD-Kamera 105 aufgenommen und mit einer Bildverarbeitung 106 weiterverarbeitet werden. Die Integration des Gleichanteils des Mischproduktes in der CCD-Photoladung entspricht der Bildung der Korrelationsfunktion der beiden Mischsignale. Die abstandsbezogenen Phasenverzögerungen durch die Echolaufzeiten sowie die Amplituden können pixelweise aus drei oder mehr Interferogrammen durch unterschiedliche Phasen der demodulierenden Mischfrequenz, z. B. 0°, 120° und 240° oder 0°, 90°, 180° und 270° berechnet und somit das 3D-Tiefenbild rekonstruiert werden.

Der zweidimensionale optische Mischer 103 bzw. 104, der auch als räumlicher Lichtmodulator (Spatial Light Modulator SLM) bezeichnet wird, besteht dabei bspw. aus einer Pockelszelle, die eine Reihe schwerwiegender, in der Literatur beschriebener Nachteile aufweist.

Weitere Realisierungsmöglichkeiten bieten LCD-Fenster, die zwar billig, aber bzgl. der gewünschten Bandbreite um etwa den Faktor 1000 zu niedrig liegen.

Ebenfalls teuer und aufwendig ist der Einsatz einer sogenannten Mikrokanalplatte, wie sie in Bildverstärkern eingesetzt wird. Durch Modulation der an den Mikrokanälen angelegten Beschleunigungsspannung, die die Sekundärelektronenemission in den Mikrokanälen beeinflusst, kann die Verstärkung moduliert werden.

Weiterhin wird im Stand der Technik ein Vorschlag eines 2D-Korrelators auf der Basis eines CCD-Photodetektorarrays gemacht: "The Lock-In CCD-Two Dimensional Synchronous Detection of Light" von Spirig, Seitz et. al., veröffentlicht im IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 31, No. 9, Sept. 1995, Seite 1705 — 1708. Dort wird ein Photopixel über 4 Transfergates abgefragt, um die Phase sinusmodulierten Lichts zu ermitteln. Pro Sinusperiode werden mit den 4 Transfergates je eine äquidistante Probe entnommen, wodurch sich die Phase leicht berechnen läßt. Dieser Prozeß ist für die aufgezeigten Problemstellungen zu langsam, da das harmonische Lichtsignal zunächst während einer die Bandbreite signifikant begrenzenden Abtastdauer aufintegriert wird. Erst dann erfolgt mit der Übernahme der gespeicherten Ladung als Abtastprobe der gewünschte Mischprozeß.

Der Erfindung liegt daher das technische Problem zugrunde, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung der Phasen- und/oder Amplitudeninformation und damit der Einhüllenden einer Lichtwelle anzugeben, die ein einfacheres, breitbandigeres und preisgünstigeres Korrelatorkonzept und über eine vorgebbare Beleuchtung eine schnelle 3D-Objektvermessung ermöglichen.

Das zuvor aufgezeigte technische Problem wird nun durch das Verfahren nach Anspruch 1 sowie durch das photonische Mischelement nach Anspruch 14, durch die Mischelementanordnung nach Anspruch 20 und durch die Vorrichtung nach Anspruch 23 gelöst.

Das erfindungsgemäße Prinzip basiert auf einer durch die Modulationsphotogatespannung erzeugten Drift und Trennung der durch die Lichtwelle photogenerierten Minoritätsladungsträger im Material unterhalb von mindestens zwei benachbarten lichtempfindlichen Modulationsphotogates. Diese Ladungsträger driften dabei unter dem Einfluß der an den Modulationsphotogates anliegenden Modulationsphotogatespannungen  $U_{am}(t)$  und  $U_{bm}(t)$  je nach Polarität bzw. Phase zu den mit vorzugsweise der doppelten Gleichspannung  $U_a$  und  $U_b$  vorgespannten Akkumulationsgates. Die Modulationsphotogatespannungen  $U_{am}(t)$  und  $U_{bm}(t)$  liegen vorzugsweise komplementär an und setzen sich vorzugsweise aus einer Vorspannung  $U_0$  und der im Gegentakt überlagerten Modulationsspannung  $+U_m(t)$  bzw.  $-U_m(t)$  zusammen. Die beiden Modulationsphotogates bilden zusammen vorzugsweise eine quadratische Fläche. Ein Pixel mit nur zwei Modulationsphotogates kann auch als Zweifachpixel bezeichnet werden.

Dieses erfindungsgemäße Prinzip setzt den photoelektrischen Quanteneffekt, verursacht durch elektromagnetische Wellen, voraus. Trotzdem wird — ohne daß dies als Einschränkung zu begreifen ist — immer von Lichtwellen gesprochen.

In der modulationsspannungsabhängigen bzw. phasenabhängigen Drift der photoerzeugten Ladungsträger zur rechten oder zur linken Seite der Modulationsphotogates ("Ladungsschaukel") besteht der eigentliche Misch- bzw. Multiplikationsprozeß. Dabei stellt die Ladungsdifferenz zwischen den so getrennten, unter den Akkumulationsgates gesammelten und an die Ausleseelektronik weitergeleiteten Ladungsträgern unter Berücksichtigung einer Integration in einer vorgegebenen Zeit ein Maß für die Korrelationsfunktion der Einhüllenden des einfallenden modulierten Lichtsignals und der Modulationsspannung  $U_m(t)$  dar.

Gleichzeitig bleibt die Ladungssumme dieser zu den Akkumulationsgates gedrifteten und weitergeleiteten Ladungsträger von der Stellung der Ladungsschaukel unbeeinflusst und steht als entsprechende Pixelintensität bzw. als Pixelgrauwert zur Verfügung.

Um die relative Phase oder Zeitverzögerung der einfallenden Lichtwelle zu bestimmen, ist es — wie oben beschrieben — notwendig, drei Messungen für die drei Größen Gleichspannungs- und Wechselspannungsanteil sowie relative Phase durchzuführen. Daher ist eine Ausgestaltung des Pixels des photonischen Mischelementes mit drei lichtempfindlichen Modulationsphotogates möglich, die mit Modulationsphotogatespannungen beaufschlagt werden, die drei verschiedene Phasenverschiebungen zur vom Sender ausgestrahlten Lichtwelle aufweisen.

Zur Bestimmung der Phase des Empfangssignals an jedem Pixel des photonischen Mischelementes aus den resultierenden Korrelationsamplituden werden zweckmäßiger Weise jedoch vier verschiedene Messungen bei vier verschiedenen Phasen des Mischersignals herangezogen. Dadurch erhält man eine Überbestimmung, durch die das Rauschen entscheidend verringert werden kann.

Durch die Gegentaktanordnung der Modulationsphotogatespannungen an zwei Modulationsphotogates pro Pixel werden jeweils zwei dieser Messungen gleichzeitig durchgeführt. Daher genügt es bspw. bei einer HF-Modulation, zwei um jeweils  $90^\circ$  verschobene Messungen bei  $0^\circ/180^\circ$  wie auch bei  $90^\circ/270^\circ$  Phasendifferenz der Modulationsphotogatespannungen  $U_{am}(t)$  bzw.  $U_{bm}(t)$  gegenüber der Phase des eingestrahnten Lichtes durchzuführen, um die notwendigen vier verschiedenen Meßwerte zu erhalten.

Besonders bevorzugt ist daher eine Anordnung, bei der das jeweils ein Pixel bildende photonische Mischelement aus vier symmetrisch angeordneten Modulationsphotogates besteht, wobei jeweils zwei sich gegenüberliegende Modulationsphotogates mit Gegentakt- bzw. um  $180^\circ$  phasenverschobenen Modulationsphotogatespannungen beaufschlagt sind, wobei die beiden im Zusammenhang mit dem Zweifachpixel zuvor beschriebenen um jeweils  $90^\circ$  verschobenen Messungen bei  $0^\circ/180^\circ$  wie auch bei  $90^\circ/270^\circ$  Phasendifferenz der Modulationsphotogatespannungen in diesem Fall gleichzeitig durchgeführt werden. Ein solches Pixel kann auch als Vierfachpixel bezeichnet werden.

Für eine Eichung der Phasenverschiebung der Modulationsphotogatespannungen  $U_{am}(t)$  und  $U_{bm}(t)$  ist es weiterhin in bevorzugter Weise möglich, einen Teil der vom Sender abgestrahlten Lichtwelle als Referenz direkt auf mindestens einen von mehreren Pixeln einer Anordnung von einer Mehrzahl von photonischen Mischelementen zu richten. Die von diesem direkt bestrahlten Pixel gewonnene Phasen- und Amplitudeninformation kann dann für die Eichung benutzt werden bzw. für eine Justierung der Phasenverschiebung auf einen vorgegebenen Wert verwendet werden.

Umgekehrt kann bei fremderregter unbekannter Modulation der von einem aktiven Objekt abgestrahlten, einfallenden Lichtwelle mit Hilfe mindestens eines photonischen Mischelementes die Lichtwelle mit der bekanntlich hohen Auflösung eines Lock-in-Verstärkers vermessen werden. Dazu bildet das photonische Mischelement zusammen mit einem an die Stelle des Senders tretenden durchstimmbaren Modulationsgenerators einen Phasenregelkreis. Weiterhin findet sowohl bei der Lock-in-Verstärkung der Phase-Lock-Loop für bspw. für eine HF-Modulation als auch der Delay-Lock-Loop für eine digitale Modulation Anwendung.

Für die Vermessung passiver Objekte kann die Modulation des abgestrahlten Lichtes sowie die entsprechende Modulation der Modulationsphotogatespannungen  $U_{am}(t)$  bzw.  $U_{bm}(t)$  auf verschiedene Weise durchgeführt werden. Zunächst kann eine kontinuierliche HF-Modulation durchgeführt werden, wobei wiederholt in Zeitabständen, die rückwirkend von der Pixelintensität beeinflusst werden können, die Ladungsdifferenzen und die Ladungssummen zur Auswertung der Phasen- und Amplitudeninformation der Lichtwelle ausgelesen werden.

Vorteilhaft ist eine intermittierende Betriebsweise mit pulsformiger HF-Modulation und Beleuchtung, z. B. um eine störende Hintergrundbeleuchtung jeweils kurzzeitig zu übertreffen. Dabei werden nur die photoerzeugten Ladungen jeweils während des HF-Impulses integriert und anschließend ausgewertet.

Bei der Bestimmung insbesondere der Phasen- bzw. Laufzeitinformation von reflektierten Lichtwellen können zur Erhöhung der Phasen- bzw. Laufzeitauflösung die aus der Radartechnik bekannten HF-Impulskompressionsverfahren mit schmalen Korrelationsfunktionen, z. B. die Chirp-Technik eingesetzt werden. Dabei ist sowohl das Modulationssignal des einzelnen photonischen Mischelementes als auch die mit vorgegebener Phasen-

beziehung beleuchtende Lichtwelle des Senders und somit auch die mit der gesuchten Phasenbeziehung reflektierte Lichtwelle repetierend mit einem Chirp moduliert. Durch die Chirpmodulation werden in geeigneter Weise durch Einfügen einer einstellbaren Verzögerung zwischen der Modulationsphotogatespannung des photonischen Mischelements und des vom Sender abgestrahlten Lichts Mehrfachziele aufgelöst bzw. störende Mehrfachreflexionen einer beleuchteten Szene unterdrückt.

Als weitere Modulation steht die auch unten beschriebene Pseudo-Rausch-Modulation (Pseudo-Noise(PN)-Modulation) sowohl als Basisband-PN- als auch als HF-PN-Modulation zur Verfügung. Ein Samplingbetrieb mit Abtast- und Haltevorgängen (Sample-and-Hold) bei repetierenden Lichtsignalen ist ein Sonderfall der Mischung und Korrelation mit Nadelimpulsen. Auch hierfür sowie für andere Anwendungen gepulster Modulation kann das erfindungsgemäße photonische Mischelement vorteilhaft eingesetzt werden.

Die aufgezählten Modulationsarten sind an sich sämtlich aus dem Stand der Technik bekannt.

Die zu den Akkumulationsgates gedrifteten Ladungen können nun in verschiedener Weise weiterverarbeitet werden. Zum einen kann das photonische Mischelement in CCD-Technologie realisiert sein, wobei dann die Ladungen unterhalb der Akkumulationsgates gesammelt bzw. integriert und anschließend in herkömmlicher Weise bis zur CCD-Auleschaltung z. B. im Dreiphasen-Schiebetakt verschoben und über eine p- oder n-Diffusion ausgelesen werden.

Zum anderen kann das photonische Mischelement in CMOS-Technologie als Aktivpixelelement mit pixeleigener Auslese- und Signalvorverarbeitungselektronik realisiert sein. Dabei wird praktisch die in der CCD-Technik übliche Ausleseschaltung jeweils beidseitig bis unmittelbar an die Modulationsphotogates herangeführt. Die Akkumulationsgates werden dabei vorzugsweise als gesperrte kapazitätsarme pn-Dioden ausgestaltet und leiten die ankommenden photogenierten Ladungen vorzugsweise unmittelbar über die Elektroden  $G_a$  und  $G_b$  an die Pixelauslese- und Signalvorverarbeitungselektronik zur dortigen Speicherung und Verarbeitung weiter.

Im letzteren Fall werden also die beiden Ladungsanteile der Ladungsschaukel kontinuierlich ausgelesen und können z. B. mit einem Ladungsverstärker praktisch rückwirkungsfrei auf je einer nachgeschalteten Kapazität gespeichert werden.

Es ist Stand der Technik, daß vor jeder neuen Messung die beteiligten und aufgeladenen Kapazitäten durch elektronische Reset-Schalter entladen werden und daß zweckmäßig die im Reset-Zustand gemessenen Fehlspannungen zur Korrektur der eigentlichen Meßwerte verwendet werden. Diese Anwendung des pixelweisen rückwirkungsfreien Auslesens hat den Vorteil, daß die gesamte Dynamik des photonischen Mischelementes und somit des Meßverfahrens erheblich gegenüber der Realisierung in CCD-Technologie gesteigert werden kann.

In weiter bevorzugter Weise ist es möglich, die Phasen- und Amplitudeninformation in einer Pixelauslese- und Signalvorverarbeitungselektronik vorzugsweise als On-chip-Integration direkt zu berechnen. Solch ein anwendungsspezifischer optoelektronischer Chip (ASOC) bzw. solch ein Aktiv-Pixel-Sensor (APS) erhöht die Meßrate und ermöglicht eine pixelweise Vorverarbeitung der Phasen und/oder Amplituden.

Ein wichtiger Vorteil der vorliegenden Erfindung liegt darin, daß die Modulation gleichzeitig mit der Ladungserzeugung und -trennung erfolgt. Mit anderen Worten finden die Detektion und die Mischung gleichzeitig und ohne zusätzlich rauschende und bandbegrenzende Zwischenstufen statt. Daher werden die im Stand der Technik unter anderem auftretenden zeitlichen Driftfehler verhindert, die bei einer zeitlich und räumlich von der Detektion getrennten Modulation und Integration der Ladungen zwangsläufig auftreten und nicht zu unterdrücken sind.

Ein weiterer Vorteil der vorliegenden Erfindung liegt in der hohen Grenzfrequenz des photonischen Mischelements. Die Grenzfrequenz des Ladungstransfers durch die Gegentaktmodulationsspannung ist bezüglich der maximalen Driftlänge oder Transferstrecke, also der Summenlänge der Modulationsphotogates, mit der Grenzfrequenz entsprechender MOS-Transistoren vergleichbar und erreicht somit den GHz-Bereich. Weiterhin werden durch die antisymmetrische Ladungsträgertrennung und -differenzbildung störende Gleichtaktsignale unterdrückt. Jedes nicht mit dem Modulationssignal korrelierende Störsignal, z. B. die Hintergrundbeleuchtung, wird in der Ladungsdifferenz unterdrückt, was zu einem hohen Signal-zu-Rauschverhältnis führt. Weiterhin tritt nur ein geringes Zeitdriften wegen der Zusammenfassung von Detektion, Mischen sowie Ladungsträgerintegration und -differenzbildung auf dem gleichen Chip auf. Zudem wird eine Zusammenfassung praktisch aller Meßfunktionen innerhalb einer einzigen Halbleiterstruktur möglich.

Gegenüber dem Stand der Technik der DE 44 39 298 A1 mit der Verwendung von Pockelszellen als Modulatoren sind nur geringe Modulationsspannungen im 1 statt 1000 Volt-Bereich notwendig. Zudem wird durch eine 2D-Anordnung von erfindungsgemäßen photonischen Mischelementen eine große Apertur auf der Empfängerseite gewährleistet.

Für die Bestimmung der Phasen- und/oder Amplitudeninformation ist weiterhin kein kohärentes oder polarisiertes Licht erforderlich. Damit können weitere spezifische Eigenschaften der einfallenden Lichtwellen durch Vorschalten selektierender Filter z. B. bezüglich Polarisierung und Wellenlänge des Lichts genutzt werden. Zusätzlich sind eine hohe Empfindlichkeit und ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis durch den Wegfall der nach dem Stand der Technik eingesetzten breitbandigen Photodetektorverstärker und elektronischen Mischer gegeben.

Die spektrale optische Bandbreite der zu vermessenden Lichtwellen wird durch die spektrale Photoempfindlichkeit des in der Raumladungszone unter den Photogates verwendeten Materials bestimmt, d. h. z. B. bei Silizium etwa der Wellenlängenbereich 0,3 bis 1,1  $\mu\text{m}$ , bei InGaAs etwa 0,8 bis 1,6  $\mu\text{m}$  und bei InSb etwa 1 bis 5,5  $\mu\text{m}$ .

Die photonischen Mischelemente können in einer beliebigen null-, ein- oder zweidimensionalen Anordnung angeordnet werden und bieten somit ein breites Spektrum an Anwendungsgeometrien. Dabei können mehrere 100.000 photonische Mischelemente parallel mit einer Modulationsbandbreite von z. B. 10–1000 MHz betrieben werden, so daß z. B. eine Kameraaufnahme einer 3D-Szene mit Bestimmung der Entfernungsinformation in

jedem Bildpunkt extrem schnell realisierbar ist. Über die Ladungsdifferenzen der zu den Akkumulationsgates fließenden und ausgelesenden Ladungen wird pixelweise das Phasenbild  $\phi(x,y)$  oder — im Falle modulierter Beleuchtung — das Entfernungsbild bzw. Tiefenbild mit dem Radiusvektor bzw. Voxelabstand  $R(x,y)$  bestimmt. Die entsprechenden Ladungssummen ergeben den konventionellen Pixelgrauwert  $A(x,y)$ . Beide können zum skalierten Grauwertbild bzw. zum 3D-Bild  $A(x,y,z)$  zusammengefaßt werden.

Die 3D-Bild-Wiederholrate liegt dabei im Bereich von etwa 10 Hz bis über 1000 Hz und hängt von der Anzahl der verwendeten photonischen Mischelemente und der Lichtintensität ab. Durch zusätzliche Farbfilter ist es möglich, die üblichen Farbwerte Rot( $x,y$ ), Grün( $x,y$ ) und Blau( $x,y$ ) des Entfernungsbildes  $R(x,y)$  zu gewinnen.

Durch den integrierten Aufbau von Mischung und Ladungsträgerintegration wird nicht zuletzt auch ein einfacher Aufbau des photonischen Mischelementes erreicht. Schließlich muß kein besonderer Aufwand im Empfangskanal geleistet werden, denn eine konventionelle Abbildungsoptik reicht für die Abbildung der einfachen, ggfs. reflektierten Lichtwelle aus, sofern eine ein- oder zweidimensionale Szene und nicht nur ein Punkt aufgenommen werden soll. Durch synchrones Zoomen der Sende- und Empfangsoptik ist die Meßvorrichtung an unterschiedliche 3D-Szenen flexibel anpaßbar.

Die Erfindung wird im folgenden anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert, wobei auf die Zeichnung Bezug genommen wird. In der Zeichnung zeigt

Fig. 1 a) im Querschnitt ein Pixel eines ersten Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen photonischen Mischelementes in CCD-Technologie sowie b)–f) die Potentialverteilung  $U_S(t)$  für die verschiedenen Phasen bzw. Zeiten der beiden komplementären Modulationsphotogatespannungen  $U_{am}(t)$  und  $U_{bm}(t)$ .

Fig. 2 eine Blockbilddarstellung zweier linear angeordneter Pixel in CCD-Technologie einschließlich einem Teil einer Interline-Transfer-Auslesevorrichtung,

Fig. 3 im Diagramm die Intensitätsverteilung des eingestrahlichten Lichtes und die Potentialverläufe der Spannungen  $U_{sep}(t)$ ,  $U_a(t)$ ,  $U_{am}(t)$ ,  $U_{bm}(t)$  und  $U_b(t)$  im Falle einer HF-Modulation,

Fig. 4 im Diagramm die Charakteristik des Misch- und Korrelationsergebnisses des photonischen Mischelementes in Form der gemittelten zu den Akkumulationsgates driftenden photogenerierten Ladungsträgerströme  $\bar{I}_a$  und  $\bar{I}_b$  bei einer HF-Modulation in Abhängigkeit von der relativen Phasen- bzw. Laufzeitverschiebung  $\phi_{opt} = \omega_m \tau$ ,

Fig. 5 im Diagramm für eine PN-Modulation a) das Modulationssignal, b) die Charakteristik des Misch- und Korrelationsergebnisses sowohl für eine Zweifachpixel (nur  $\bar{I}_a$  und  $\bar{I}_b$ ) als auch für ein Vierfachpixel mit  $\bar{I}_a$  und  $\bar{I}_b$  bei einer Verzögerung des Modulationssignals für das 3. und 4. Modulationsgate  $c_m$  und  $d_m$  von  $T_B$  sowie c) die für die Entfernungsauswertung relevanten Differenzwerte  $\Delta \bar{I}_{ab} + \Delta \bar{I}_{cd} = \bar{I}_a - \bar{I}_b + (\bar{I}_c - \bar{I}_d)$  und  $\Delta \bar{I}_{ab} - \Delta \bar{I}_{cd} = \bar{I}_a - \bar{I}_b - (\bar{I}_c - \bar{I}_d)$ ,

Fig. 6 a) im Querschnitt ein Pixel eines zweiten Ausführungsbeispiels in CCD-Technologie eines erfindungsgemäßen photonischen Mischelementes mit einem mittleren Modulationsphotogate  $G_0$  sowie die Potentialverteilungen unter den Modulationsphotogates und Akkumulationsgates b) für eine positive und c) für eine negative Modulationsspannung  $U_m(t)$ ,

Fig. 7 a) im Querschnitt ein Pixel eines dritten Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen photonischen Mischelementes sowie b)–f) die Potentialverteilungen für die verschiedenen Phasen analog zu Fig. 1,

Fig. 8 in einer Draufsicht ein Pixel eines vierten Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen photonischen Mischelementes mit vier Modulationsphotogates und vier Akkumulationsgates, als Vierfachpixel bezeichnet,

Fig. 9 in einer Draufsicht ein Pixel eines fünften Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen photonischen Mischelementes mit vier Modulationsphotogates und vier Akkumulationsgates und einem zentralen symmetrischen mittleren Gate  $G_0$ ,

Fig. 10 eine schematische Darstellung einer aus dem Stand der Technik bekannten Vorrichtung zur Bestimmung der Phasen- und Amplitudeninformation einer Lichtwelle,

Fig. 11 eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Bestimmung der Phasen- und Amplitudeninformation einer Lichtwelle für HF-Modulation,

Fig. 12 eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Bestimmung der Phasen- und Amplitudeninformation einer Lichtwelle z. B. für PN-Modulation oder Rechteckmodulation,

Fig. 13 a) im Querschnitt ein Pixel eines sechsten Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen photonischen Mischelementes mit Pixelauslese- und -vorverarbeitungselektronik in CMOS-Technologie sowie b) und c) die Potentialverteilung analog zu Fig. 6 für zwei Phasen bzw. Polaritäten der Modulationsphotogatespannung und

Fig. 14 in einer Draufsicht ein Pixel eines siebten Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen photonischen Mischelementes mit vier Modulationsphotogates, vier Akkumulationsgates sowie einem kreuzförmig aus gestalteten mittleren Gate  $G_0$ , vorzugsweise für digitale Modulation.

Fig. 1a zeigt den Querschnitt eines einzelnen Pixels 1 eines photonischen Mischelementes am Beispiel einer CCD-Struktur. Dabei umfaßt das photonische Mischelement neben dem Pixel 1 die für die Spannungsversorgung und die Signableitungen notwendigen Strukturen. Die äußeren Gates  $G_{sep}$  dienen lediglich zur elektrischen Abgrenzung dieses Pixels gegenüber benachbarten Strukturen.

Die in Fig. 1 gezeigte Ausführung ist auf einem p-dotierten Siliziumsubstrat 2 ausgeführt. Der Misch- oder Multiplikationsvorgang des vorgeschlagenen Konzepts sei zunächst für reine CW-Hochfrequenzmodulation betrachtet.

Bezogen auf den Querschnitt zeigt Fig. 1b–f schematisch die Potentialverteilungen für verschiedene Phasen des Mischprozesses. Die mittleren Modulationsphotogates  $G_{am}$  und  $G_{bm}$  stellen den lichtsensitiven Teil dar und befinden sich im Inversionszustand. Zusätzlich zu einer positiven Vorspannung  $U_0$  an der leitfähigen aber optisch teiltransparenten oberen Abdeckung z. B. aus Poly-Silizium werden sie mit den überlagerten Gegen-taktspannungen  $U_m(t)$  betrieben. Es ergeben sich die Modulationsspannungen  $U_{am}(t) = U_0 + U_m(t)$  bzw.  $U_{bm}(t)$

$$= U_0 - U_m(t).$$

Diese verursachen multiplikativ eine Separierung der durch die Photonen der einfallenden Lichtwelle in der Raumladungszone erzeugten Minoritätsladungsträger unmittelbar unterhalb der Isolatorschicht 3, z. B. aus Siliziumoxyd oder Siliziumnitrid. Diese Ladungsträger (im Beispiel Elektronen) driften unter dem Einfluß der modulierenden Gegentaktspannung zu den eng benachbarten positiven Akkumulationsgates  $G_a$  oder  $G_b$  und werden dort aufintegriert während die Majoritätsladungsträger bzw. Löcher zum Masseanschluß des p-Si-Substrats fließen. Auch eine rückwärtige Beleuchtung ist möglich.

Fig. 2 zeigt eine Aufsicht von zwei Pixeln 1 des erfinderischen photonischen Mischelementes einschließlich eines Teils einer Interline-Transfer-Auslesevorrichtung 7 in Form eines 3-Phasen-CCD-Schieberegisters, an dessen einem Ende sich die Ausleseelektronik mit einem Diffusionsübergang für die serielle Weiterverarbeitung der durch die Korrelation gewonnen Ladungswerte befindet. Nach einer vorgebbaren Zeit  $T$  für die Ladungsakkumulation unter allen Akkumulationsgates der Zeile werden z. B. bei Pixel Nr.  $n$  die Ladungen  $q_a$  und  $q_b$  unter  $G_a$  und  $G_b$  über das Transfergate  $TG_a$  bzw.  $TG_b$  auf das 3-Phasen-Ausleseschieberegister gegeben. Die begrenzenden Separationsgates  $G_{sep}$  schirmen das Korrelationspixel gegen unerwünschte äußere Einflüsse ab und liegen vorzugsweise auf Massepotential.

In Fig. 3 sind die zu Fig. 1 gehörenden Spannungsverläufe dargestellt. Die Modulationsphotogates  $G_{am}$  und  $G_{bm}$  werden mittels der in Fig. 3 dargestellten Modulationsphotogatespannungen, die eine gegenphasige HF-Modulationsspannung  $U_m(t)$  enthalten, angesteuert, die wie folgt beschrieben sind:

$$U_{am} = U_0 + U_m \cos(\omega_m t) \quad (1a)$$

und

$$U_{bm} = U_0 + U_m \cos(\omega_m t - 180^\circ) = U_0 - U_m \cos(\omega_m t) \quad (1b)$$

In Fig. 1b–f ist die Potentialverteilung  $U_s(s)$  in der Raumladungszone über der räumlichen Ausdehnung  $s$  eines repräsentativen Pixels 1 für alle beteiligten Gates dieses Pixels in der zeitlichen Sequenz von  $t_0$  bis  $t_8$  für die Dauer einer Periode  $T_m$  des HF-Modulationssignals anschaulich dargestellt. An den Akkumulationsgates  $G_a$  und  $G_b$  sorgt eine relativ hohe positive Spannung für die Ansammlung der photogenerierten Ladungsträger, nachdem diese nach Maßgabe und Polarität der Modulationsphotogatespannungen  $U_{am}(t)$  und  $U_{bm}(t)$  entweder vorwiegend zur linken oder zur rechten Seite des in Fig. 1 im Querschnitt gezeigten Pixels 1 gedriftet sind. Dieser Vorgang wirkt sich dann in besonderer Weise aus, wenn die Lichtmodulation und die Modulationsphotogatespannung  $U_{am}(t)$  die gleiche Frequenz aufweisen. Dann entsteht je nach der Phasendifferenz  $\phi_{opt}$  eine mittlere Vorzugsrichtung der Ladungsträgerdrift zu den Akkumulationsgates  $G_a$  und  $G_b$ . Die zugehörigen gemittelten Ströme werden durch  $\bar{i}_a$  und  $\bar{i}_b$  beschrieben.

Der zugrundeliegende Korrelationsprozeß kann mathematisch so beschrieben werden: In der Empfangsebene des im allgemeinsten Fall 2D-Arrays photonischer Mischelemente ist  $z = 0$  und die einfallende modulierte Lichtwelle wird dort allgemein durch  $P_{opt}(x, y, t - \tau)$  beschrieben. Hier wird sie über die photogenerierten Ladungsträger mit dem dort wirkenden Gegentakts-Modulationssignal, in allgemeiner Form durch  $U_m(x, y, t)$  beschrieben, bezüglich der Ladungsdifferenzen der beiden Akkumulationsgates annähernd multiplikativ und integrativ verknüpft. Die entsprechende Korrelationsfunktion  $\phi_{U_m, P_{opt}}(x, y, t)$  wird z. B. für alle gemittelten Differenzen der Ladungsträgerdrifts  $\Delta q_{ab}/T = \Delta \bar{i}_{ab} = \bar{i}_a - \bar{i}_b$  (mit  $T$  = Integrationszeit) zu den Akkumulationsgates  $G_a$  und  $G_b$  im allgemeinsten Fall ortsabhängig als Dreifachfaltung beschrieben:

$$\phi_{U_m, P_{opt}}(x, y, \tau) = k_1 \cdot U_{am}(-x, -y, -\tau) \cdot P_{opt}(x, y, \tau) = k_2 \cdot \Delta \bar{i}_{ab}(x, y, \tau) \quad (2)$$

mit der Laufzeitdifferenz  $\tau = \phi_{opt}/\omega_m$ , der Modulationskreisfrequenz  $\omega_m$  und den strukturabhängigen, jedoch für das Funktionsprinzip unwesentlichen Konstanten  $k_1$  und  $k_2$ .

Das erfindungsgemäße photonische Mischelement löst diese Aufgabe mit hoher Orts- und Zeitaufklärung durch den schnellen separierenden Ladungstransport der Photoelektronen und deren Gegentaktspeicherung und Differenz- und Summenauswertung. Durch Differenzbildung der gemittelten Driftströme  $\Delta \bar{i}_{ab}(t) = \bar{i}_a(t) - \bar{i}_b(t)$ , die bei nichtstationären Lichtwellen zeitabhängig sind, werden dabei alle störenden Offset-Anteile unterdrückt und zugleich wird die gewünschte Korrelationsfunktion des Lichtsignals  $P_{opt}(t - \tau)$  mit der Modulationsspannung  $U_m(t)$  gebildet.

Dieser Vorgang soll im einzelnen näher beschrieben werden. Das über  $U_{am}(t)$  und  $U_{bm}(t)$  verursachte HF-Driftfeld bewirkt, daß die Elektronen zu der jeweilig positiven Seite driften. Während z. B. der positiven Halbwelle der Modulationsphotogatespannung  $U_{am}(t) = U_0 + U_m(t)$ , d. h., während der negativen Halbwelle von  $U_{bm}(t) = U_0 - U_m(t)$ , werden die photogenerierten Ladungsträger zum Akkumulationsgate  $G_a$  driften und dort als Ladungsmenge  $q_a$  angesammelt bzw. weitergeleitet (vergleiche die beiden oberen Modulationsphotogatespannungsverteilungen in Fig. 1b und c). In Fig. 3 ist für den Fall einer stationären, harmonisch modulierten Beleuchtung die optische Leistung pro Pixel dargestellt als

$$P_{opt}(t - \tau) = P_0 + P_m \cos(\omega t - \phi_{opt}) \quad (3)$$

wobei  $P_0$  der Mittelwert inklusiv der Hintergrundbeleuchtung,  $P_m$  die Modulationsamplitude,  $\omega_m$  die HF-Modulationsfrequenz,  $\phi_{opt}$  die Phasenverzögerung und  $\tau = \phi_{opt}/\omega_m$  die entsprechende Laufzeitverzögerung der

einfallenden Lichtwelle gegenüber der Modulationsphase an  $G_{am}$  repräsentiert. Der gesamte erzeugte Photostrom pro Pixel ist

$$i(t) = S_\lambda \cdot P_{opt}(t - \tau) = S_\lambda [P_0 + P_m \cdot \cos(\omega_m t - \varphi_{opt})] \quad (4)$$

$$i(t) = I_0 + I_m \cdot \cos(\omega_m t - \varphi_{opt}) \quad (5)$$

mit den Größen  $i(t) = i_a(t) + i_b(t)$ ,  $I_0$  = Mittelwert des Pixelphotostroms gemäß  $P_0$ ,  $I_m$  = Wechselamplitude des modulierten Photostroms gemäß  $P_m$ , und  $S_\lambda$  = Spektrale Empfindlichkeit. Dieser gesamte Photostrom pro Pixel ist in zwei Anteile aufgeteilt und zwar in den Strom  $i_a(t)$  des Akkumulationsgates  $G_a$  und in den Strom  $i_b(t)$  des Akkumulationsgates  $G_b$ . Da diese Werte aufintegriert werden — in CCD-Technologie unter den jeweiligen Akkumulationsgates  $G_a$  und  $G_b$  und bei der pixelweise auslesenden CMOS-Technologie vorzugsweise in der Ausleseelektronik — genügt es, im folgenden die Mittelwerte  $\bar{i}_a$  und  $\bar{i}_b$  dieser Ströme zu berücksichtigen. Das Maximum der Ladungsseparation wird für den Winkel  $\varphi_{opt} = 0$  bzw.  $\tau = 0$  erreicht. Dieser Fall ist in Fig. 3 dargestellt.

Bei harmonischer Modulation ergibt sich unter der Voraussetzung idealisierter Bedingungen wie geeigneter Modulationsamplitude, vernachlässigbarer Driftlaufzeiten, 100%-Modulationstiefe mit  $P_m = P_0$  für die mittleren Photoströme  $\bar{i}_a$  bzw.  $\bar{i}_b$

$$\bar{i}_a = \frac{I_0}{2} + \frac{I_m}{\pi} \cos(\varphi_{opt}) \quad (6)$$

$$\bar{i}_b = \frac{I_0}{2} - \frac{I_m}{\pi} \cos(\varphi_{opt}) \quad (7)$$

In Fig. 4 ist der Verlauf dieser idealisierten mittleren Pixelströme gezeigt. Sie repräsentieren die gegenphasigen Korrelationsfunktionen, die aus den HF-modulierten Empfangslicht und den an den Modulationsphotogates  $G_{am}$  und  $G_{bm}$  angelegten HF-Modulationsphotogatespannungen resultieren. Ihre Summe entspricht mit  $I_0$  der mittleren Pixellichtleistung  $P_0$ . Die gesamte Ladungsmenge, die über der Zeit  $T = N \cdot T_m$  (d. h., über  $N$  Perioden  $T_m$  der HF-Modulationsspannung) angesammelt wird, ergibt sich zu

$$\bar{i}_a(\tau) \cdot T = q_{aT}(\tau) = \frac{I_0}{2} + \text{const.} \int_0^T P_{opt}(t - \tau) \cdot U_m(t) \cdot dt \quad (8)$$

mit einer der Phasenverzögerung entsprechenden Laufzeit  $\tau = \varphi_{opt}/\omega_m$ . Im folgenden wird  $q_{aT}$  nur noch mit  $q_a$  bezeichnet. Die Gesamtheit der Ladungen der Akkumulationsgates  $G_a$  bzw.  $G_b$  aller Pixel 1 formt zwei ortsdiskrete HF-Interferogramme, das a-Interferogramm bzw. das um  $180^\circ$  gegenüber dem a-Interferogramm verschobene b-Interferogramm, aus denen durch Differenzbildung das laufzeitbestimmte und gesuchte Differenz-HF-Interferogramm gebildet wird, das durch Gleichung (2) beschrieben wird.

In Fig. 11 ist das Schema einer erfindungsgemäßen 3D-Kamera gezeigt, das die direkte Mischung auf der Basis eines Arrays photonischer Mischelemente nutzt. Verglichen mit dem aus dem Stand der Technik bekannten 3D-Kamerakonzep, daß in Fig. 10 dargestellt ist, wird in Fig. 11 die Modulation eines Senders 4 für eine Beleuchtung optisch passiver 3D-Objekte durch die Direktmodulation des Stroms einer Laserdiodenrealisiert. Dabei wird die Modulation durch einen HF-Generator 13 erzeugt. Für größere Abstände ist z. B. der Einsatz eines leistungsstarken Laserdiodenarrays mit vorzugsweise gemeinsamem Modulationsstrom und — zur Augensicherheit — mit unterschiedlichen Wellenlängen vorteilhaft.

Eine erste Optik 5 bildet die Lichtwelle auf die Oberfläche eines Objektes 6 ab. Die vom Objekt 6 reflektierte Lichtwelle wird dann durch eine zweite Optik 7 auf die Oberfläche eines photonischen Mischelementarrays 8 abgebildet.

Das photonische Mischelementarray 8 wird ebenfalls durch den HF-Generator 13 angesteuert, wobei die Ansteuerung für unterschiedliche Phasenverschiebungen zur Phase der abgestrahlten Lichtwelle durch den HF-Generator 13 erfolgt. Die Signale des photonischen Mischelementarrays 8 werden, soweit nicht bereits on-chip geschehen, schließlich von einer Auswerteeinheit 9 ausgewertet.

Aufgrund der erfindungsgemäßen Meßvorrichtung ist für das vorgeschlagene 3D-Kamerakonzep neben dem erfindungsgemäßen photonischen Mischelementarray kein zusätzlicher optischer Modulator mit hoher Apertur notwendig, was zu einer wirtschaftlich vorteilhaften Lösung führt.

Zur Bestimmung der Pixelphase  $\varphi_{opt}$  aus den resultierenden Korrelationsamplituden werden wie zuvor angegeben insgesamt vier verschiedene Interferogramme bei vier verschiedenen Phasen des Mischersignals herangezogen. Die vier Phasen des Mischersignals ergeben sich für den Fall, daß die Modulationsphotogatespannungen  $U_m$  und  $U_{bm}$  vom Zustand des Phasenverhältnisses  $0^\circ/180^\circ$  auf den Zustand  $90^\circ/270^\circ$  umgeschaltet bzw. um  $90^\circ$  verzögert werden. Auf diese Weise erhält man die beiden zugehörigen Imaginär- bzw. Quadrat-Komponenten zu den Real- bzw. Inphase-Komponenten, woraus die gesuchte Pixelphase gemäß der unten beschriebenen Gleichung (10) berechnet werden kann.

Diese Vorgehensweise ermöglicht gleichzeitig die Eliminierung von störenden Offset-Spannungen, die durch



die Hintergrundhelligkeit und durch den Mischvorgang erzeugt werden.

Neben dem beispielhaft beschriebenen Meßvorgang von CW-modulierten 3D-Lichtwellen durch 2D-Korrelation mit einer Modulationsspannung  $U_m(x,y,t)$  vorzugsweise gleicher Frequenz in der Ebene des photonischen Mischelementarrays kann die erfindungsgemäße Meßvorrichtung auch mit pulsförmigen Modulationssignalen vorteilhaft eingesetzt werden.

Für Aufgaben der hochpräzisen Laufzeitmessung von 3D-Lichtwellen ist insbesondere eine Pseudo-Rausch-Modulation des Lichts vorteilhaft. Eine beispielhafte Ausführung zur Vermessung optisch passiver 3D-Objekte zeigt Fig. 12. Die erfindungsgemäße Vorrichtung weist ähnlich dem Ausführungsbeispiel mit harmonischer Modulation in Fig. 11 eine entsprechende Beleuchtungseinrichtung auf, die die 3D-Objekte 6 mit in der Intensität PN(Pseudo-Noise)-moduliertem Licht beleuchtet und das reflektierte und empfangene Licht dem Korrelationsprozeß mit vorzugsweise dem entsprechenden PN-Modulationssignal, das vom Generator 13 erzeugt wird, unterzieht.

Da die Korrelation derartiger PN-Signale mit zunehmender Wortlänge  $TW = T_B(2^N - 1)$  einem dreieckförmigen Nadelimpuls mit einer Halbwertsbreite gleich der Bitbreite  $T_B$  ähnelt, muß zur eindeutigen und vollständigen Vermessung des ganzen Lichtvolumens bzw. des ganzen beleuchteten Raumes eine relative Verzögerung  $T_D$  zwischen dem lichtmodulierenden PN-Signal und der demodulierenden PN-Gegentaktspannung  $U_m(t)$  der gleichen Signalfrequenz an den Modulationsphotogates mindestens einmal den ganzen Verzögerungsbereich der maximalen Echolaufzeit kontinuierlich oder schrittweise in  $T_B$ -Schritten durchlaufen. Dazu dient das von der Steuerungs- und Auswerteeinheit 9 bezüglich der Verzögerung  $T_D$  einstellbare Verzögerungsglied 11.

In Fig. 5a ist am Beispiel einer rechteckförmigen 15Bit-PN-Sequenz das Modulationssignal  $U_m(t)$  dargestellt. Das Ergebnis der Korrelation durch das photonischen Mischelement sind die in Fig. 5b über der relativen Verzögerung  $\tau$  dargestellten gemittelten Driftströme  $\bar{I}_a$  und  $\bar{I}_b$ .

Beim später beschriebenen Vierfachpixel gemäß Fig. 8, Fig. 9 und Fig. 14 sind die an den Modulationsphotogates  $G_{cm}$  und  $G_{dm}$  anliegenden und der Vorspannung  $U_0$  überlagerten Gegentakt-Modulationsphotogatespannungen vorzugsweise um  $T_B$  gegenüber den an den Modulationsphotogates  $G_a$  und  $G_b$  anliegenden Gegentakt-Modulationsphotogatespannungen verzögert, d. h.  $U_{cm}(t) = U_0 + U_m(t - T_B)$  und  $U_{dm}(t) = U_0 - U_m(t - T_B)$ , was zu sehr vorteilhaften Amplituden- und Laufzeitmessungen führt.

Bis auf eine vorgebbare Verzögerung  $T_D$  der Modulationsspannungen weist die vom Sender 4 abgestrahlte Lichtintensität  $\text{const} \cdot P_{opt}(t)$  die gleiche PN-Signalstruktur auf. Die Reflexion erreicht das photonische Mischelement nach der Echolaufzeit. Die Korrelation mit den Gegentaktmodulationsspannungen führt je nach der relativen Laufzeitverzögerung  $\tau$  für  $T_D = 0$  im Idealfall ohne Hintergrundhelligkeit beim Zweifachpixel auf die in Fig. 5b gezeigten mittleren Pixelströme  $\bar{I}_a$  und  $\bar{I}_b$  und beim Vierfachpixel mit dem genannten  $T_B$ -Zeitversatz zusätzlich auf die mittleren Pixelströme  $\bar{I}_a$  und  $\bar{I}_d$ . Diese Korrelationscharakteristik offenbart zunächst, daß mehrere Objektreflexionen auf dem gleichen Radiusvektor unterschieden werden können, z. B. zur Unterscheidung mehrerer hintereinander stehender teiltransparenter Objekte oder zur Elimination von Mehrfachreflexionen.

Zusätzlich werden beim Zweifachpixel nacheinander und beim Vierfachpixel gleichzeitig vorzugsweise in der jeweils entsprechenden Pixelauslese- und Signalvorverarbeitungselektronik 15 die in Fig. 5c dargestellte Summe und Differenz der mittleren Driftstromdifferenzen gebildet. Sie erlauben hochempfindliche Messungen, da nur in dem  $T_B$  bis  $2T_B$  breiten Meßfenster Signalwerte ungleich Null erscheinen. Durch die Auswertung der Summe wird die Relevanz einer Messung aufgrund einer Mindestamplitude bestimmt. Die Differenz zeigt einen steilen linearen Verlauf im nutzbaren  $T_B$ -breiten Meßfenster, der eine Laufzeitbestimmung mit hoher Auflösung erlaubt. Für das hier idealisierte Beispiel ist

$$\tau = T_D + \frac{T_B}{2} - \left[ \frac{\Delta \bar{I}_{ab} - \Delta \bar{I}_{cd}}{\Delta \bar{I}_{ab} + \Delta \bar{I}_{cd}} \right] * \frac{T_B}{2} \quad (9)$$

Das Blockschaltbild einer entsprechenden Meßvorrichtung zur optischen Vermessung von 3D-Objekten mit PN-Modulation auf der Basis des vorgeschlagenen Korrelations-Photodetektorarrays ist durch einen besonders einfachen Aufbau charakterisiert, wie in Fig. 12 veranschaulicht ist. Außer dem Generator 10 und dem Verzögerungsglied 11 ist dabei der gleiche Aufbau wie in Fig. 11 gegeben.

Zur schnellen Entfernungsbestimmung bei geringerer Auflösung wird erfindungsgemäß auch eine einfache Rechteckmodulation des Senders 4 durch den Generator 10 mit der Periode  $T$  und vorzugsweise gleicher Puls- und Pausendauer  $T_B$  verwendet. Die Laufzeitermittlung erfolgt nach Gleichung (9). Die Auflösung wird schrittweise durch die mit dem Faktor 2 abnehmende Periodendauer  $T$  erhöht, wobei auf den ersten Meßschritt zunächst ein zweiter mit gleicher Periode aber einer Zeitverschiebung  $T_D = T/4$  erfolgt.

Der in Fig. 1 beispielhaft dargestellte Querschnitt des Pixels 1 des erfindungsgemäßen photonischen Mischelementes kann bezüglich seiner Grenzfrequenz durch eine geeignete Auslegung des durch die Gegentaktmodulationsspannung verursachten Potentialgefälles optimiert werden. Hierzu zeigt Fig. 6 ein Ausführungsbeispiel, bei dem ein mittleres Gate  $G_0$  zwischen den Modulationsphotogates  $G_{am}$  und  $G_{bm}$  angeordnet ist, das vorzugsweise auf der Vorspannung  $U_0$  liegt, und das zusammen mit den Modulationsphotogates  $G_{am}$  und  $G_{bm}$  drei Potentialstufen bildet. Erwünscht ist ein möglichst gleichmäßiges Potentialgefälle bzw. ein möglichst konstantes Modulationsdriftfeld, was durch Erhöhung der Stufenzahl von zwei auf drei oder auch mehr erreicht wird. In der photosensitiven Raumladungszone nimmt mit dem Abstand von der Isolierschicht 3 ohnehin die Ausprägung der Stufen ab. Dieser Effekt wird in einer weiteren erfindungsgemäßen Ausführung genutzt, und zwar durch Verwendung eines sogenannten "Buried Channel", eines von der Isolierschicht einige  $\mu\text{m}$  entfernten, etwas tiefer



im p-Substrat unter den Modulationsphotogates liegenden, schwach dotierten n-Kanals. Weiterhin ist eine Abschattung 12 für die Akkumulationsgates  $G_a$  und  $G_b$  vorgesehen, damit diese nicht von der Lichtwelle beleuchtet werden und zusätzliche Ladungsträger erzeugt werden.

Fig. 7 zeigt eine besondere Ausführung und Verbindung photonischer Mischelemente, bei der gegenüber der in Fig. 1 die beiden Modulationsphotogates jeweils nur durch ein gemeinsames Akkumulationsgate  $G_{s,n}$  getrennt sind, wodurch ein höherer Füllwirkungsgrad erreicht wird. Auch hier ist eine Abschattung 12 der Akkumulationsgates  $G_a$  und  $G_b$  vorgesehen. Dabei wechselt die Polarität der Gegentaktmodulationsspannungen bzw. die Reihenfolge von  $G_{am,n}$  und  $G_{bm,n}$  von Pixel zu Pixel. Diese Dreierperiode der Gates eignet sich zugleich zum direkten Auslesen durch einen Betrieb als Drei-Phasen-Schieberegister. Ein in bestimmten Anwendungen tolerierbarer Nachteil liegt in der Ladungsverteilung auch auf die jeweils benachbarten Pixel, die zu einer scheinbaren Pixelvergrößerung und geringerer Ortsauflösung in der betreffenden Richtung führt.

Eine Berechnung dieser Zusammenhänge ergibt, daß gegenüber einer 100%-Nutzladung bei der Auswertung der Ladungsdifferenzen das zentrale, betrachtete Pixel nur 50% erhält und die beiden Nachbapixel jeweils 25% erhalten.

Zur Veranschaulichung der Ladungsverteilung sind in Fig. 7 analog zu Fig. 1 die verschiedenen Phasen der Potentialverteilung für CW-Modulation dargestellt.

In Fig. 8 ist eine weitere vorteilhafte Ausführung des Designs eines Pixels eines photonischen Mischelementes dargestellt, das bei CW-Modulation keine IQ (Inphase, Quadraturphase)-Umschaltung zwischen den I- und Q-Zuständen benötigt. Anstelle des zuvor beschriebenen Zweifachpixels wird ein Vierfachpixel mit den Modulationsphotogates  $G_{am}$ ,  $G_{bm}$ ,  $G_{cm}$  und  $G_{dm}$  sowie den zugehörigen Akkumulationsgates  $G_a$ ,  $G_b$ ,  $G_c$  und  $G_d$  vorgeschlagen, das die Korrelation gleichzeitig für vier Phasenlagen ermöglicht, da die Gegentakt-Modulationsphotogatespannungen  $U_{am}(t)$  und  $U_{bm}(t)$  bzw.  $U_{cm}(t)$  und  $U_{dm}(t)$ , insbesondere bei HF-Modulation um  $90^\circ$ , gegeneinander verschoben sind.

In orthogonaler Anordnung zu den beschriebenen Modulationsphotogates  $G_{am}$  mit  $\varphi_{am} = 0^\circ$  und  $G_{bm}$  mit  $\varphi_{bm} = 180^\circ$  befinden sich daher zwei weitere innerhalb des Pixels symmetrisch integrierte Modulationsphotogates  $G_{cm}$  mit  $\varphi_{cm} = 90^\circ$  und  $G_{dm}$  mit  $\varphi_{dm} = 270^\circ$ , die nach dem gleichen Prinzip arbeiten. Auf diese Weise entsteht eine Vierphasen-Ladungsakkumulation mit den Einzelladungen  $q_a$ ,  $q_b$ ,  $q_c$  und  $q_d$  unter den zugehörigen Akkumulationsgates  $G_a$ ,  $G_b$ ,  $G_c$  und  $G_d$  oder in der zugehörigen Ausleseelektronik, wobei mittels einer einfachen arithmetischen Operation die zugehörige Phase  $\varphi_{opt}$  folgendermaßen direkt berechnet wird:

$$\varphi_{opt} = \arctan \frac{q_c - q_d}{q_a - q_b} \quad (10)$$

Für die einfache Grauwertbestimmung eines einzelnen Pixels werden die Einzelladungen aller Akkumulationsgates eines Pixels aufsummiert:  $q_{pixel} = q_a + q_b + q_c + q_d$ . Der Ausleseprozeß der jeweils vier Ladungen wird in diesem Fall zweckmäßig durch ein aktives Pixeldesign in CMOS-Technik mit pixelweise integrierter Signalvorverarbeitung durchgeführt.

Fig. 9 zeigt ebenso wie Fig. 8 ein Vierfachpixel eines photonischen Mischelementes, allerdings mit einem entsprechend Fig. 6 geglättetem Potentialgefälle mit Hilfe des zentralen, vorzugsweise auf dem Potential  $U_0$  liegenden quadratischen mittleren Gate  $G_0$ .

Fig. 14 zeigt ebenso wie Fig. 9 ein Vierfachpixel eines photonischen Mischelementes mit einer für digitale Modulationssignale optimierten Struktur. Das zwischen den vorzugsweise quadratischen Modulationsphotogates angeordnete mittlere Gate  $G_0$  dient ähnlich wie in Fig. 9 der Glättung des durch die Modulationsphotogatespannung erzeugten Potentialgefälles.

Fig. 13 zeigt schließlich eine weitere bevorzugte Ausführungsform eines Pixels 1, das im Gegensatz zu den zuvor aufgezeigten Ausführungsbeispielen nicht in CCD-Technologie, sondern in CMOS-Technologie mit pixelweiser Auslese- und Signalvorverarbeitungselektronik 15 realisiert ist. Die Funktionsweise des modulationsspannungsabhängigen Driftens der Ladungsträger auf der Ladungsschaukel ist dabei dieselbe wie bei den zuvor aufgezeigten Ausführungsbeispielen. Unterschiedlich ist bei dem in Fig. 13 dargestellten Ausführungsbeispiel lediglich die Art der Weiterverarbeitung der zu den Akkumulationsgates  $G_a$  und  $G_b$  gedrifteten Ladungen  $q_a$  und  $q_b$ .

Die Akkumulationsgates  $G_a$  und  $G_b$  sind im vorliegenden Ausführungsbeispiel als gesperrte pn-Dioden ausgebildet. Auf einem vorzugsweise schwach dotierten p-Si-Substrat 3 in Fig. 13 werden die positiv vorgespannten Akkumulationsgates  $G_a$  und  $G_b$  durch  $n_+$ -dotierte Elektroden gebildet. Im sog. "Floating-Diffusion"-Betrieb bzw. im hochohmigen Spannungsauslesemodus werden wie bei der CCD-Technologie die Ladungen  $q_a$  und  $q_b$  auf den Kapazitäten der Akkumulationsgates  $G_a$  und  $G_b$  integriert und als Spannungswerte hochohmig ausgelesen.

In vorteilhafter Weise kann auch ein Stromauslesemodus eingesetzt werden, bei dem die photogenerierten Ladungsträger nicht im Potentialtopf integriert, sondern fortlaufend über eine Ausgangsdiffusion über an die Akkumulationsgates  $G_a$  bzw.  $G_b$  angeschlossene, geeignete Stromausleseschaltungen weitergeleitet werden. Anschließend werden diese Ladungen bspw. jeweils auf einer externen Kapazität integriert.

Durch eine Ausleseschaltung im Stromauslesemodus, der durch Verstärkerrückkopplung die Akkumulationsgatespannung virtuell konstant hält, wird in vorteilhafter Weise vermieden, daß bei einer intensiven Bestrahlung des Pixels die Menge der angesammelten Ladungen  $q_a$  und  $q_b$  zu einer Rückwirkung oder gar zu einem Überlaufen des Potentialtopfes führt. Die Dynamik des photonischen Mischelementes wird dadurch erheblich verbessert. Auch hierbei wird durch die genannte Technik eines Schwach dotierten n-Kanals ("Buried Layer") unter der Isolierschicht der Modulationsgates Verbesserungen, u. a. eine Steigerung der Grenzfrequenz erzielt.

Die Ausgestaltung des photonischen Mischelementes in CMOS-Technologie ermöglicht weiterhin die Anwendung eines Aktiv-Pixel-Designs (APS), mit dem zu jedem Pixel eine Auslese- und Signalvorverarbeitungsschaltung in das photonische Mischelement integriert werden kann. Somit ist eine Vorverarbeitung der elektrischen Signale direkt am Pixel möglich, bevor die Signale an eine externe Schaltung weitergeleitet werden. Insbesondere kann somit die Phasen- und Amplitudeninformation direkt auf dem Chip berechnet werden, so daß sich die Meßrate weiter erhöhen läßt.

In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung wird ein vorzugsweise zweidimensionales photonisches Mischelementarray für ein dreidimensionale elektronische Objektsuche und -verfolgung passiv oder aktiv leuchtender Objekte nach verschiedenen Kriterien, wie z. B. Objektform, -position, -farbe, -polarisation, -geschwindigkeitsvektor, -helligkeit oder einer Kombination von Objekteigenschaften verwendet. Wird z. B. beim Durchlaufen verschiedener Modulationssignale (z. B. Frequenz- oder Codeänderung) bei der 3D-Vermessung einer einfallenden Lichtwelle, die zunächst unbekannt sein kann, eine örtliche Korrelation durch das Kriterium von Differenzdriftströmen ungleich Null gefunden, so kann danach fortlaufend dieser Objektbereich gezielt bezüglich der genannten Objekteigenschaften vermessen und ggfs. bei Veränderungen über eine Regelschleife, die insbesondere die Bildtiefe mit einschließt, verfolgt werden.

Das photonische Mischelement wird in verschiedenen Betriebsweisen eingesetzt, die im folgenden dargestellt werden.

Die Summenladung an den Akkumulationsgates  $G_a$  und  $G_b$  interessiert hierbei weniger, da sie immer der Gesamtintensität der einfallenden Lichtwellen entspricht,  $q_a + q_b = \text{const.} \cdot P_{\text{opt,ges}} \cdot T$  mit  $T = \text{Integrationszeit}$ .

Die Differenzladung  $\Delta q_{ab} = q_a - q_b = I_a \cdot T - I_b \cdot T$  hängt von mehreren Faktoren ab und kann in mehrfacher Weise zur Vermessung der einfallenden Lichtwelle genutzt werden. Dazu wird eine immer vorhandene Grundhelligkeit  $P_0 > P_m$  (s. Fig. 3a) berücksichtigt.

Wahlweise wird z. B. bei einer Vermessung eines durch einen Sender 4 mit moduliertem Licht beleuchteten Objekts 6 die Sendeleistung ein- oder ausgeschaltet und damit wird  $P_m$  endlich oder gleich Null. Gleichzeitig wird wahlweise die Modulationsspannung  $U_m(t)$  entweder zu Null oder auf den im Sender verwendeten oder im einfallenden Licht enthaltenen Verlauf oder auf eine während der Integrationszeit konstante Spannung  $U_{m0}$  geschaltet.

Damit ergeben sich mit  $P_0 \neq 0$  vier wichtige Betriebsweisen:

1.  $\Delta q_{ab} = 0$  für  $P_m = 0$  und  $U_m = 0$ .
2.  $\Delta q_{ab} = 0$  bei endlichem  $P_m$  und mit  $U_m(t)$  als HF-Modulationssignal.
3. Mit endlichem  $P_m$  und einer hochfrequenten Modulationsspannung ist  $\Delta q_{ab}$  eine Funktion von  $U_m(t)$ , von der relativen Modulationslaufzeitverschiebung  $\tau$  und von dem einfallenden, derart modulierten Lichtleistungsanteil  $P_m(t)$ .
4. Besteht während einer Integrationszeit  $T$  eine einfallende mittlere Lichtintensität  $P_0$  und eine konstante Modulationsspannung  $U_{m0}$ , so ist die Differenzladung  $\Delta q_{ab}$  eine Funktion von  $U_{m0}$  und der mittleren Lichtleistung  $P_0$ .

Bei Lichtwellen, die nicht intensitätsmoduliert sind, wird in einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung das photonische Mischelement entsprechend dem vierten Fall einer möglichen Betriebsweise z. B. für die 2D-Bildverarbeitung eingesetzt.

Dabei ist jedes Mischelement gezielt und unabhängig voneinander ansteuerbar, z. B. durch pixelweise Zuordnung je eines schnell überschreibbaren Modulationsspannungswortes für  $U_{m0}$  vorzugsweise mittels eines RAM-Bausteins. Ausgewertet werden vorzugsweise nur die näherungsweise zu  $U_{m0}$  proportionalen Differenzdriftströme  $\Delta I_{ab}$  bzw. Differenzladungen  $T \cdot \Delta I_{ab}$ . Die Modulationsspannung  $U_{m0}$  wird dabei jeweils von dem Modulationsspannungswort abgeleitet.

Damit wird  $U_m(t)$  nicht mehr periodisch oder quasi-periodisch wie in den vorangehenden Anwendungsbeispielen, sondern aperiodisch z. B. gemäß einem vorgegebenen oder gemäß dem gemessenen Bildinhalt eingestellt. Für  $U_m(t) = 0$  ergeben sich alle Differenzströme zu Null, so daß das zugehörige Differenzbild  $D(x,y)$  ebenfalls mit der Amplitude bzw. Intensität Null erscheint.

Die Differenzbildhelligkeit kann somit gezielt durch Variation von  $U_m(x,y,t)$  beeinflusst werden. Damit können erfindungsgemäß beliebige, also auch unmodulierte Lichtwellen bzw. Bilder über eine extrem schnell einstellbare Gewichtsfunktion  $G(x,y,t) = k_1 \cdot U_m(x,y,t)$  z. B. über die genannten steuerbaren, pixelweise zugeordneten Speicherzellen einer vielseitigen Bildverarbeitung erschlossen werden, wie z. B. die zuvor aufgeführten Anwendungen zur Objektsuche und -verfolgung, allerdings hierbei ohne den Aspekt der Tiefeninformation.

#### Patentansprüche

##### 1. Verfahren zur Bestimmung der Phasen- und/oder Amplitudeninformation einer elektromagnetischen Welle

- bei dem eine elektromagnetische Welle auf die Oberfläche eines mindestens ein Pixel aufweisenden photonischen Mischelementes eingestrahlt wird, wobei das Pixel mindestens zwei lichtempfindliche Modulationsphotogates  $G_{am}$  und  $G_{bm}$  und zugeordnete Akkumulationsgates  $G_a$  und  $G_b$  aufweist,
- bei dem an die Modulationsphotogates  $G_{am}$  und  $G_{bm}$  Modulationsphotogatespannungen  $U_{am}(t)$  und  $U_{bm}(t)$  angelegt werden, die als  $U_{am}(t) = U_0 + U_m(t)$  und  $U_{bm}(t) = U_0 - U_m(t)$  ausgestaltet sind,
- bei dem an die Akkumulationsgates  $G_a$  und  $G_b$  eine Gleichspannung angelegt wird, deren Betrag mindestens so groß wie der Betrag der Summe aus  $U_0$  und der Amplitude der Modulationsspannung  $U_m(t)$  ist,

- bei dem die in der Raumladungszone der Modulationsphotogates  $G_{am}$  und  $G_{bm}$  von der einfallenden elektromagnetischen Welle erzeugten Ladungsträger in Abhängigkeit von der Polarität der Modulationsphotogatespannungen  $U_{am}(t)$  und  $U_{bm}(t)$  dem Potentialgefälle eines Driftfeldes ausgesetzt werden und zum entsprechenden Akkumulationsgate  $G_a$  oder  $G_b$  driften und
- bei dem die jeweils zu den Akkumulationsgates  $G_a$  und  $G_b$  gedrifteten Ladungen  $q_a$  und  $q_b$  abgeleitet werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1,

- bei dem von einem Sender eine intensitätsmodulierte elektromagnetische Welle abgestrahlt wird,
- bei dem die von einem Objekt reflektierte elektromagnetische Welle auf die Oberfläche des photonischen Mischelementes eingestrahlt wird,
- bei dem die Modulationsphotogatespannungen  $U_{am}(t)$  und  $U_{bm}(t)$  mit der Phase der vom Sender abgestrahlten elektromagnetischen Welle in fester Phasenbeziehung stehen und
- bei dem die erzeugten Ladungsträger zusätzlich in Abhängigkeit von der Phase der Gegentakt-Modulationsphotogatespannungen  $U_{am}(t)$  und  $U_{bm}(t)$  dem Potentialgefälle eines Driftfeldes ausgesetzt werden.

3. Verfahren nach Anspruch 2,

- bei dem für zwei verschiedene Phasenverschiebungen  $\Delta\phi_1$  und  $\Delta\phi_2$  der Modulationsphotogatespannungen  $U_{am}(t)$  und  $U_{bm}(t)$  relativ zur Phase der vom Sender abgestrahlten elektromagnetischen Welle die Ladungen  $q_{a1}$  und  $q_{b1}$  sowie  $q_{a2}$  und  $q_{b2}$  abgeleitet und die Ladungsdifferenzen  $(q_{a1} - q_{b1})$  und  $(q_{a2} - q_{b2})$  gebildet werden und
- bei dem nach der Gleichung

$$\varphi_{opt} = \arctan \frac{q_{a2} - q_{b2}}{q_{a1} - q_{b1}}$$

die Pixelphase  $\varphi_{opt}$  der einfallenden elektromagnetischen Welle relativ zur Phase der vom Sender abgestrahlten elektromagnetischen Welle und somit die Laufzeit der vom Pixel empfangenen elektromagnetischen Welle bestimmt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3,

- bei dem mit Hilfe von vier Modulationsphotogates  $G_{am}$ ,  $G_{bm}$ ,  $G_{cm}$  und  $G_{dm}$  und von vier zugeordneten Akkumulationsgates  $G_a$ ,  $G_b$ ,  $G_c$  und  $G_d$  für zwei verschiedene Phasenverschiebungen  $\Delta\phi_1$  und  $\Delta\phi_2$  der Modulationsphotogatespannungen  $U_{am}(t) = U_0 + U_{m1}(t)$  und  $U_{bm}(t) = U_0 - U_{m1}(t)$  sowie  $U_{cm}(t) = U_1 + U_{m2}(t)$  und  $U_{dm}(t) = U_1 - U_{m2}(t)$  relativ zur Phase der vom Sender abgestrahlten elektromagnetischen Welle gleichzeitig die Ladungen  $q_a$ ,  $q_b$ ,  $q_c$  und  $q_d$  getrennt und abgeleitet werden und
- bei dem nach der Gleichung

$$\varphi_{opt} = \arctan \frac{q_c - q_d}{q_a - q_b}$$

die Pixelphase  $\varphi_{opt}$  der einfallenden elektromagnetischen Welle relativ zur Phase der vom Sender abgestrahlten elektromagnetischen Welle und somit die Laufzeit der vom Pixel empfangenen elektromagnetischen Welle bestimmt wird.

5. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche,

- bei dem das photonische Mischelement eine Mehrzahl von Pixeln aufweist,
- bei dem mindestens ein Pixel mit einem Teil der intensitätsmodulierten elektromagnetischen Welle vom Sender direkt bestrahlt wird und
- bei dem aus der mit diesem Pixel gemessenen Phasenverschiebung eine Eichung der Phasenverschiebung zwischen der abgestrahlten elektromagnetischen Welle und den Modulationsphotogatespannungen  $U_{am}(t)$  und  $U_{bm}(t)$  durchgeführt wird.

6. Verfahren nach Anspruch 1,

- bei dem eine elektromagnetische Welle mit fremderregter unbekannter Intensitätsmodulation auf die Oberfläche des photonischen Mischelementes eingestrahlt wird,
- bei dem die Modulationsphotogatespannungen  $U_{am}(t)$  und  $U_{bm}(t)$  von einem durchstimmbaren Modulationsgenerator erzeugt werden,
- bei dem die erzeugten Ladungsträger zusätzlich in Abhängigkeit von der Phase der Gegentakt-Modulationsphotogatespannungen  $U_{am}(t)$  und  $U_{bm}(t)$  dem Potentialgefälle eines Driftfeldes ausgesetzt werden und
- bei dem das photonische Mischelement und der Modulationsgenerator mindestens einen Phasenregelkreis bilden und die elektromagnetische Welle nach der Lock-in-Methode vermessen wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, bei dem als periodische Modulation eine kontinuierliche oder diskontinuierliche HF-Modulation, eine Pseudo-Rausch-Modulation oder eine Chirp-Modulation verwendet wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, bei dem die Modulation eine HF-Modulation ist und vorzugsweise die Ladungen  $q_a$  und  $q_b$  und ggfs.  $q_c$  und  $q_d$  für die Phasenverschiebungen  $\Delta\phi = 0^\circ/180^\circ$  und  $90^\circ/270^\circ$

abgeleitet werden.

9. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem eine aperiodische Modulation mit Modulationsphotogatespannungen  $U_{am} = U_0 + U_{m0}$  und  $U_{bm} = U_0 - U_{m0}$  mit zeitlich konstanter, aber variabler Modulationsspannung  $U_{m0}$  verwendet wird.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, bei dem die Ladungen  $q_a$  und  $q_b$  unterhalb der Akkumulationsgates  $G_a$  und  $G_b$  integriert werden und mit einer Multiplexstruktur, vorzugsweise mit einer CCD-Struktur, ausgelesen werden.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, bei dem die Akkumulationsgates  $G_a$  und  $G_b$  als pn-Dioden, vorzugsweise als gesperrte kapazitätsarme pn-Dioden und vorzugsweise in CMOS-Technologie, ausgebildet sind und bei dem die Ladungen  $q_a$  und  $q_b$  direkt als Spannung oder als Strom ausgelesen werden.

12. Verfahren nach Anspruch 11, bei dem die Pixelphase direkt mit Hilfe einer Aktiv-Pixel-Sensor-Struktur (APS) berechnet wird.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, bei dem die Pixelhelligkeit als Summe der Ladungen aller Akkumulationsgates ausgewertet wird.

14. Photonisches Mischelement

- mit mindestens einem Pixel (1),
- das mindestens zwei lichtempfindliche Modulationsphotogates ( $G_{am}$ ,  $G_{bm}$ ) und
- den Modulationsphotogates ( $G_{am}$ ,  $G_{bm}$ ) zugeordnete, gegenüber der einfallenden elektromagnetischen Welle ab geschattete Akkumulationsgates ( $G_a$ ,  $G_b$ ) aufweist.

15. Mischelement nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen den Modulationsphotogates ( $G_{am}$ ,  $G_{bm}$ ) ein mittleres Gate ( $G_0$ ) angeordnet ist.

16. Mischelement nach Anspruch 14 oder 15, dadurch gekennzeichnet, daß das Pixel (1) vier, vorzugsweise symmetrisch angeordnete, Modulationsphotogates ( $G_{am}$ ,  $G_{bm}$ ,  $G_{cm}$ ,  $G_{dm}$ ) und Akkumulationsgates ( $G_a$ ,  $G_b$ ,  $G_c$ ,  $G_d$ ) aufweist.

17. Mischelement nach einem der Ansprüche 14 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß das Pixel (1) in MOS-Technik auf einem Siliziumsubstrat (2) ausgeführt ist und mit einer Multiplexstruktur, vorzugsweise mit einer CCD-Struktur, auslesbar ist.

18. Mischelement nach einem der Ansprüche 14 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Akkumulationsgates ( $G_a$ ,  $G_b$ ) als pn-Dioden, vorzugsweise als gesperrte, kapazitätsarme pn-Dioden und vorzugsweise in CMOS-Technik ausgeführt, ausgebildet sind und die Ladungen  $q_a$  und  $q_b$  direkt als Spannung oder als Strom auslesbar sind.

19. Mischelement nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß das Pixel (1) als Aktiv-Pixel-Sensor-Struktur ausgebildet ist.

20. Mischelementanordnung mit mindestens zwei photonischen Mischelementen nach einem der Vorrichtungsansprüche 14 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß die photonischen Mischelemente in einer eindimensionalen oder zweidimensionalen Anordnung angeordnet sind.

21. Mischelementanordnung nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß jeweils zwei benachbart angeordnete, unterschiedlichen Pixeln ( $n$ ,  $n+1$ ) zugeordnete Modulationsphotogates ( $G_{am,n}$ ,  $G_{am,n+1}$ ) bzw. ( $G_{bm,n}$ ,  $G_{bm,n+1}$ ) jeweils ein gemeinsames Akkumulationsgate ( $G_S$ ) aufweisen und daß die Modulationsphotogates ( $G_{am,n}$ ,  $G_{am,n+1}$ ) bzw. ( $G_{bm,n}$ ,  $G_{bm,n+1}$ ) jeweils von der gleichen Modulationsphotogatespannungen  $U_{am}(t)$  bzw.  $U_{bm}(t)$  beaufschlagt sind.

22. Mischelementanordnung nach Anspruch 20 oder 21, dadurch gekennzeichnet, daß der Sender (4) direkt mindestens einen Pixel (1) mit einem Teil der intensitätsmodulierten elektromagnetischen Welle bestrahlt.

23. Vorrichtung zur Bestimmung der Phaseninformation einer elektromagnetischen Welle

- mit mindestens einem photonischen Mischelement nach einem der Vorrichtungsansprüche 14 bis 19,
- mit einem Modulationsgenerator (10, 13),
- mit einem Sender (4), dessen abgestrahlte elektromagnetische Welle vom Modulationsgenerator (10, 13) in vorgegebener Weise intensitätsmoduliert ist,
- wobei die von einem Objekt (6) reflektierte elektromagnetische Welle auf die Oberfläche des photonischen Mischelementes einstrahlt und
- wobei der Modulationsgenerator (10, 13) das photonische Mischelement mit Modulationsspannungen  $U_m(t)$  versorgt, die in vorgegebener Phasenbeziehung zur Phase der abgestrahlten elektromagnetischen Welle des Senders stehen.

24. Vorrichtung nach dem vorangegangenen Vorrichtungsanspruch, dadurch gekennzeichnet, daß eine Optik (7) und ggfs. eine Mischelementanordnung nach einem der Ansprüche 20 bis 21 vorgesehen sind, wobei die Optik (7) die reflektierte elektromagnetische Welle auf die Oberfläche des Mischelementes bzw. der Mischelementanordnung abbildet.

Hierzu 14 Seite(n) Zeichnungen

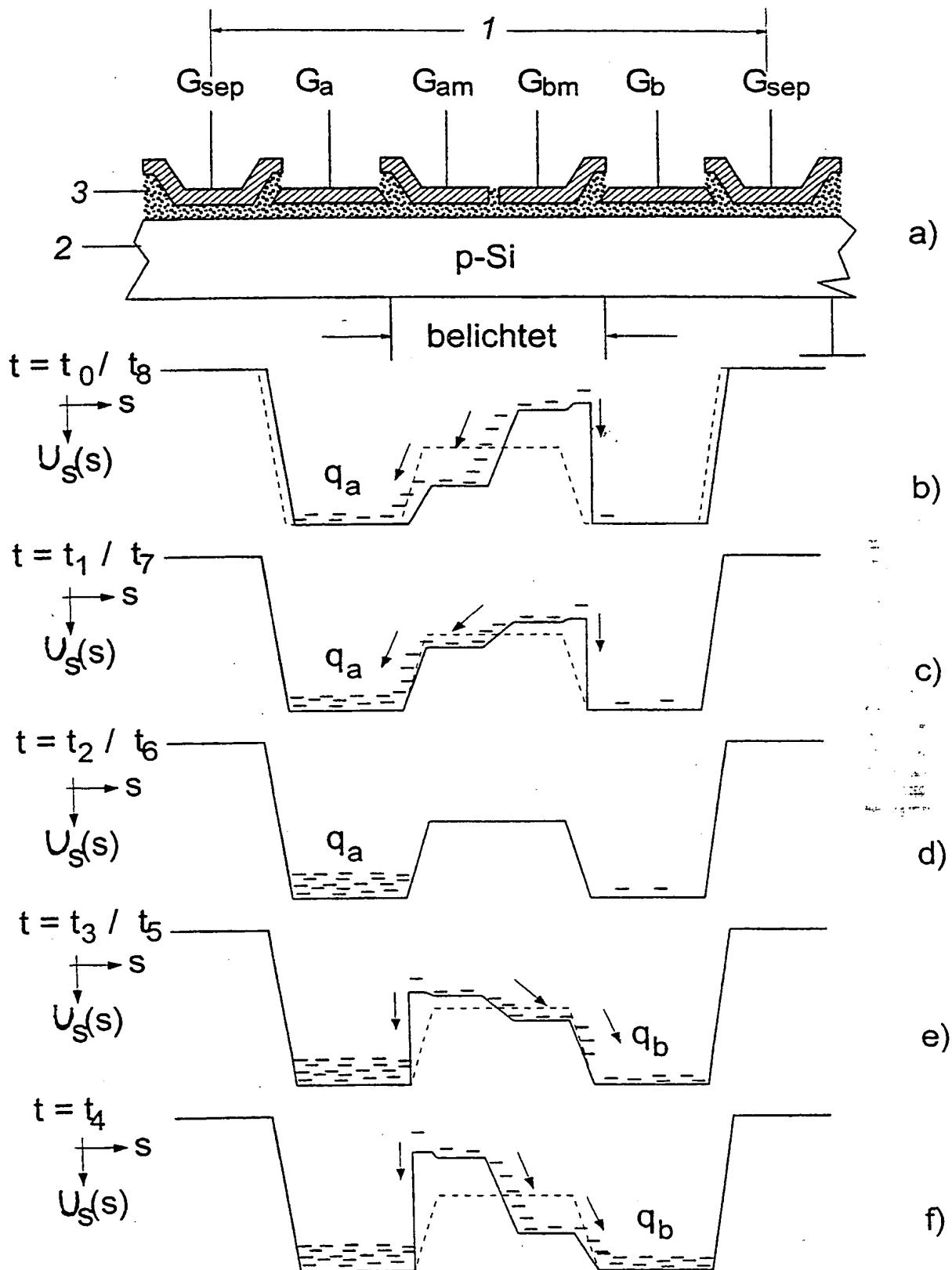


Fig. 1

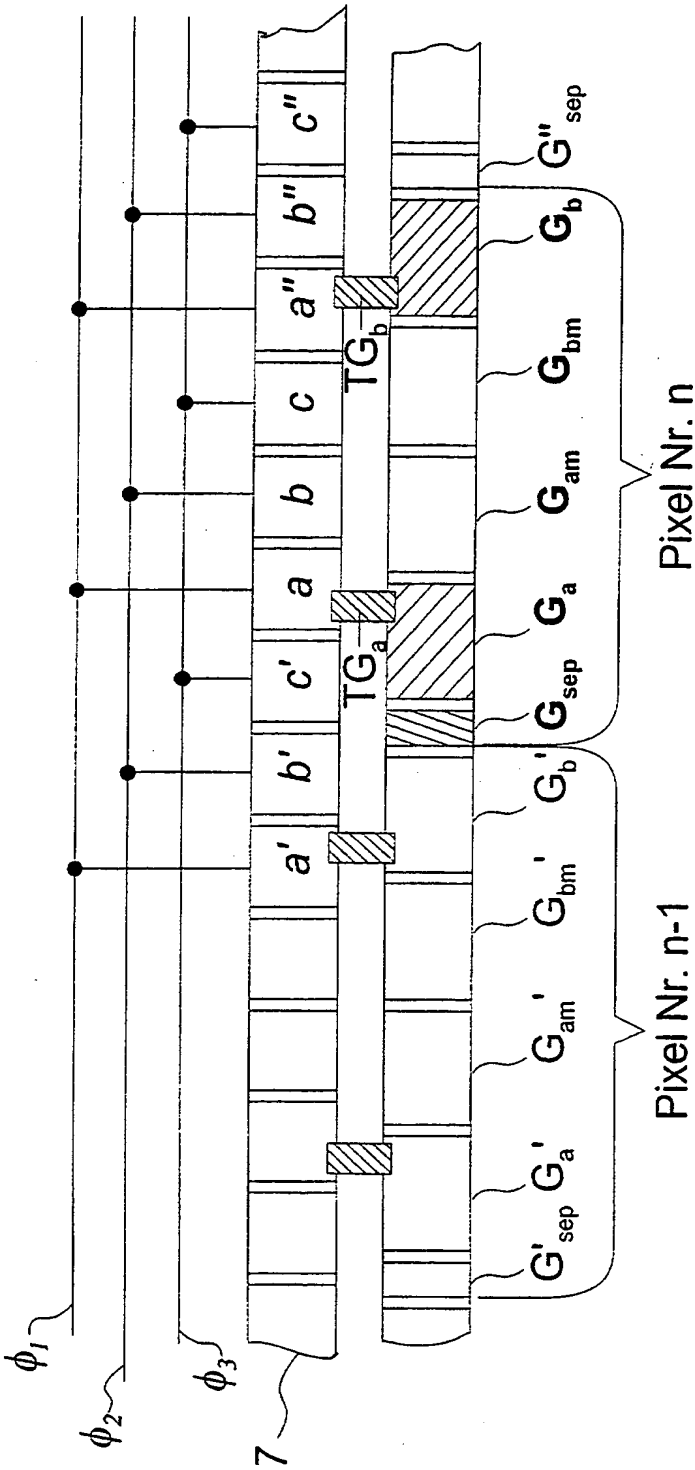


Fig. 2

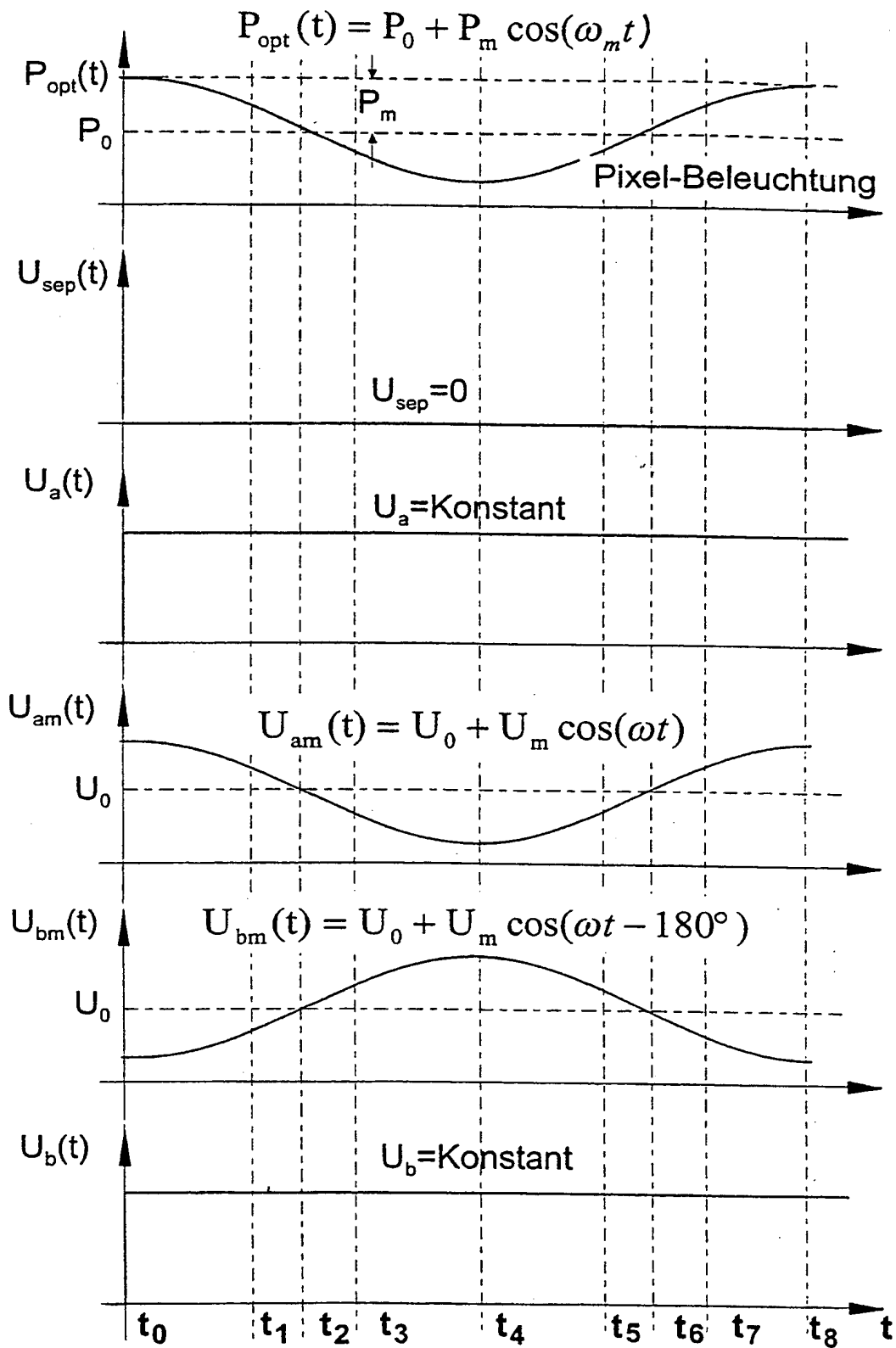
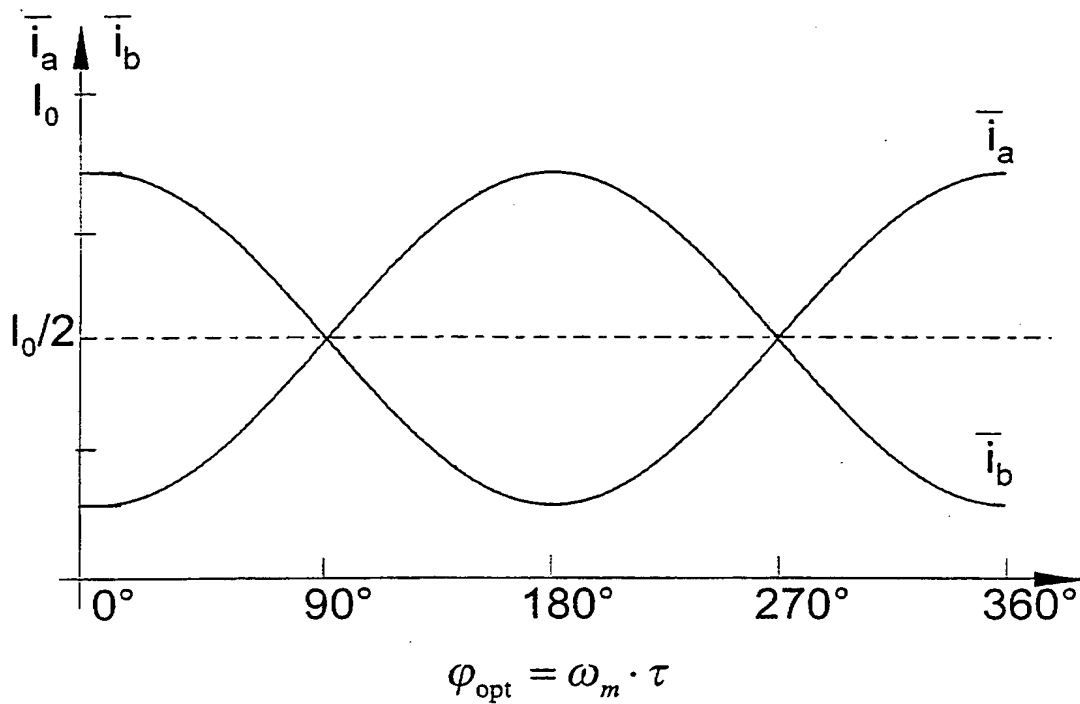
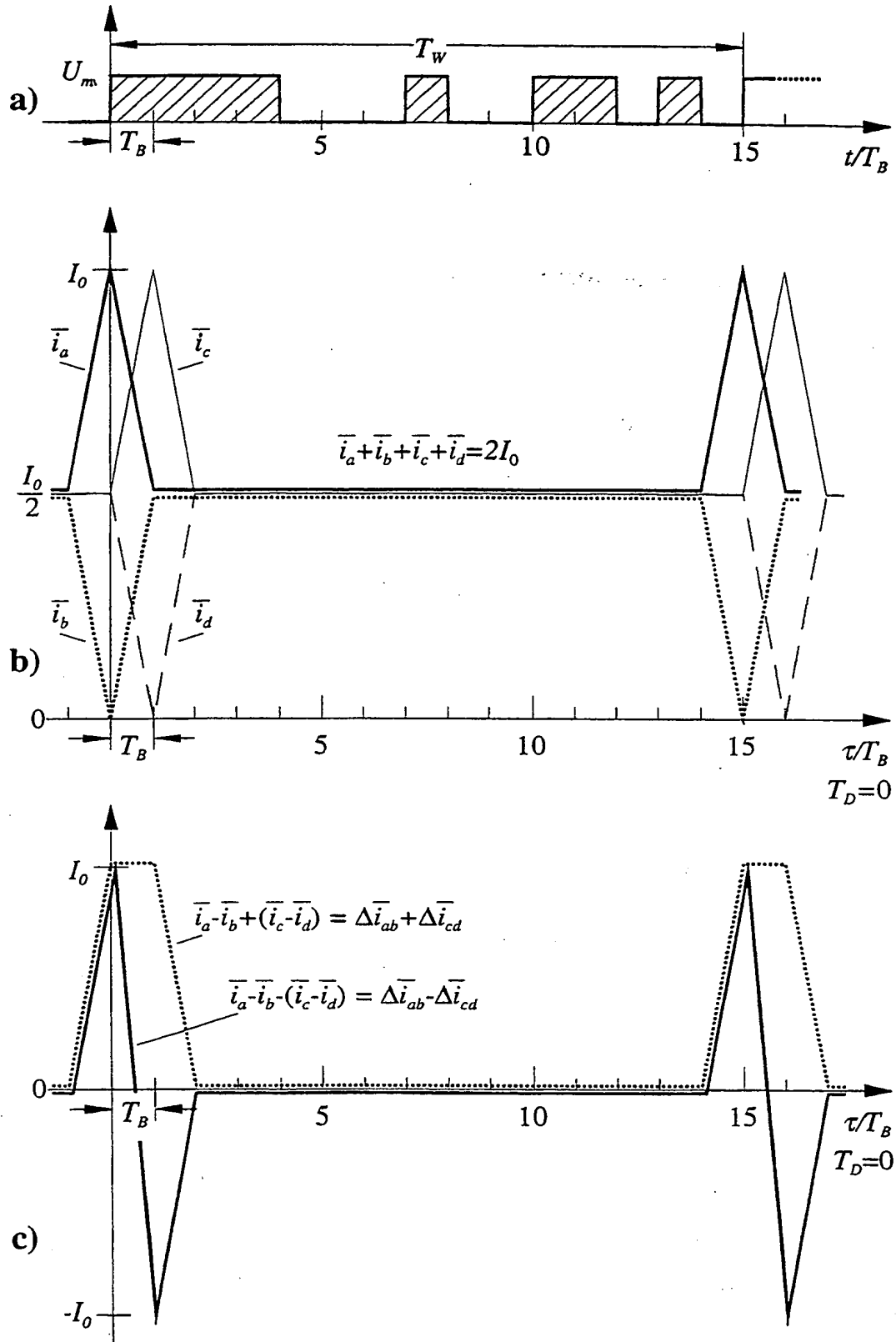


Fig. 3





**Fig. 4**



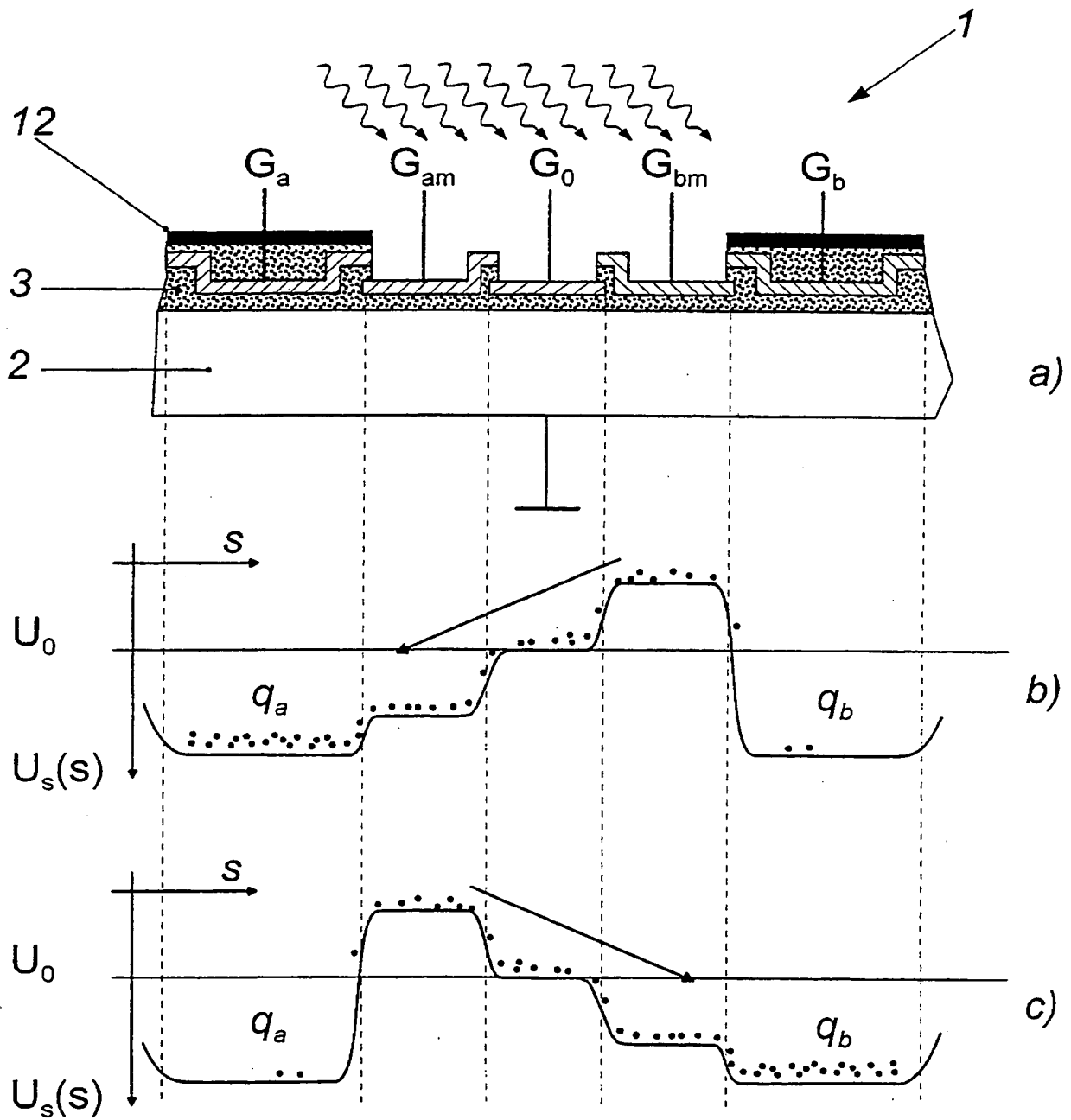


Fig. 6

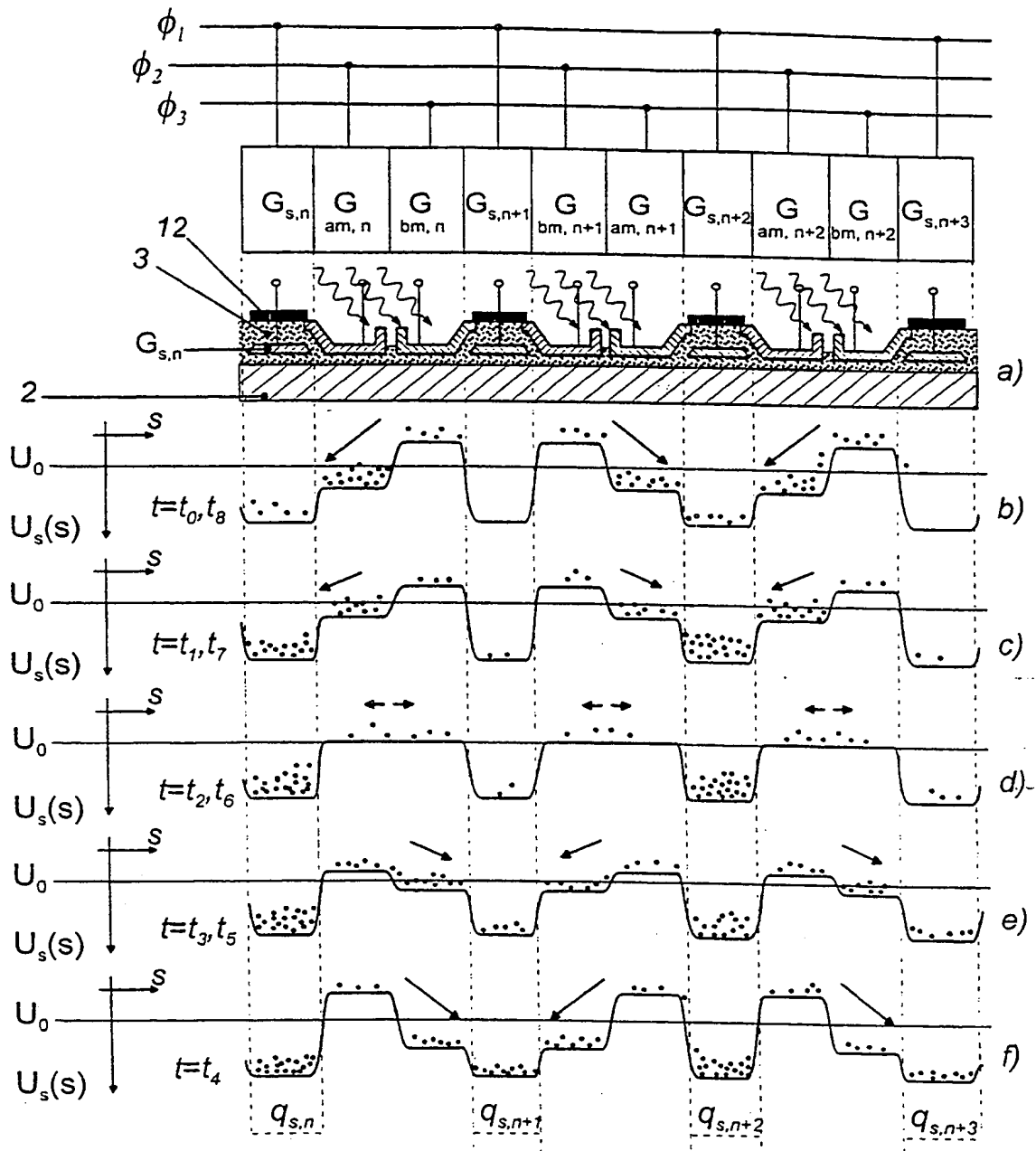


Fig. 7

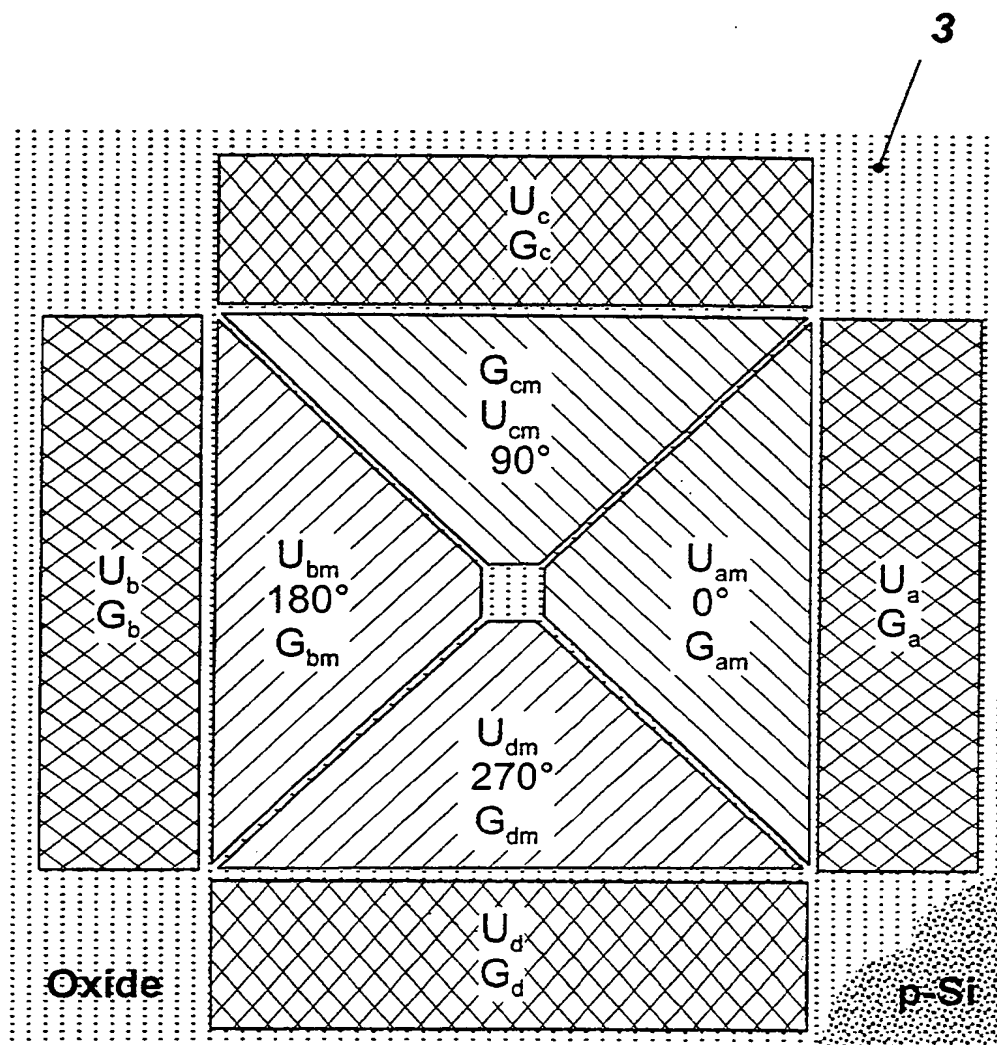


Fig. 8

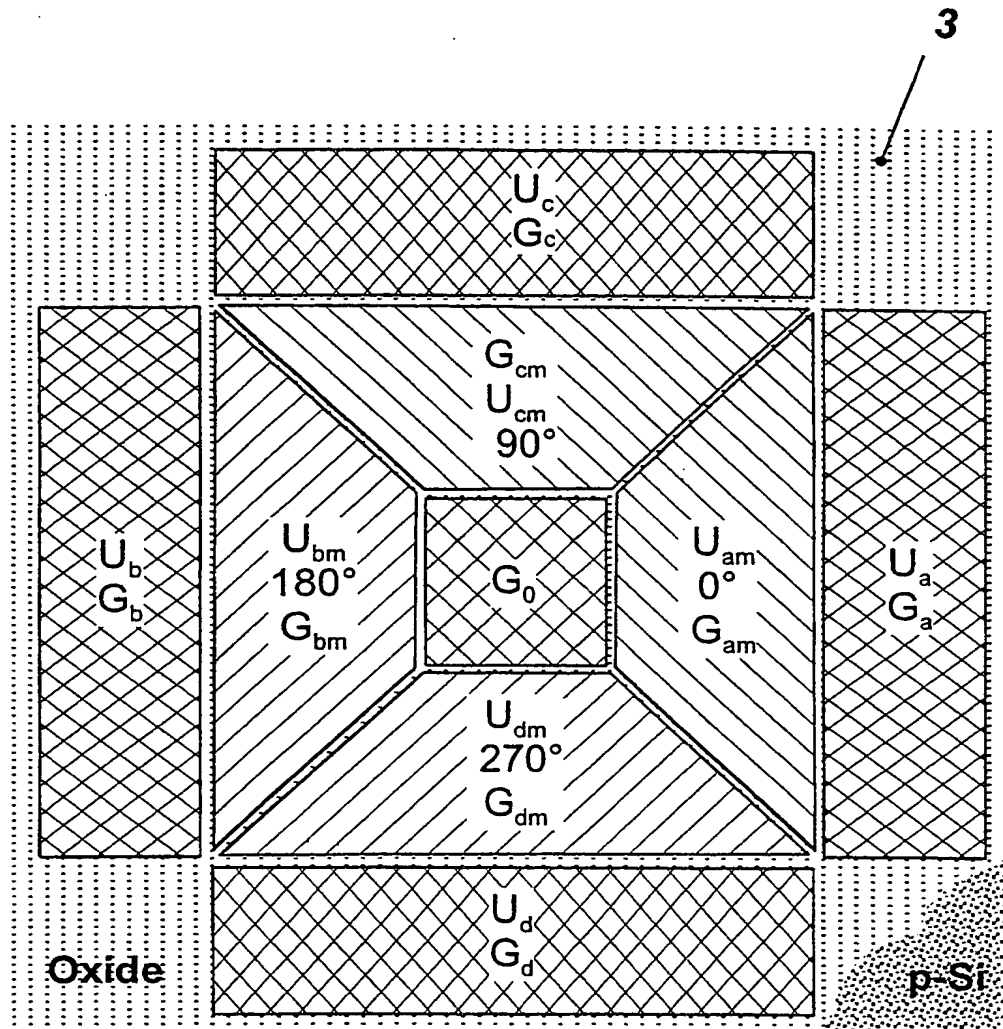


Fig. 9

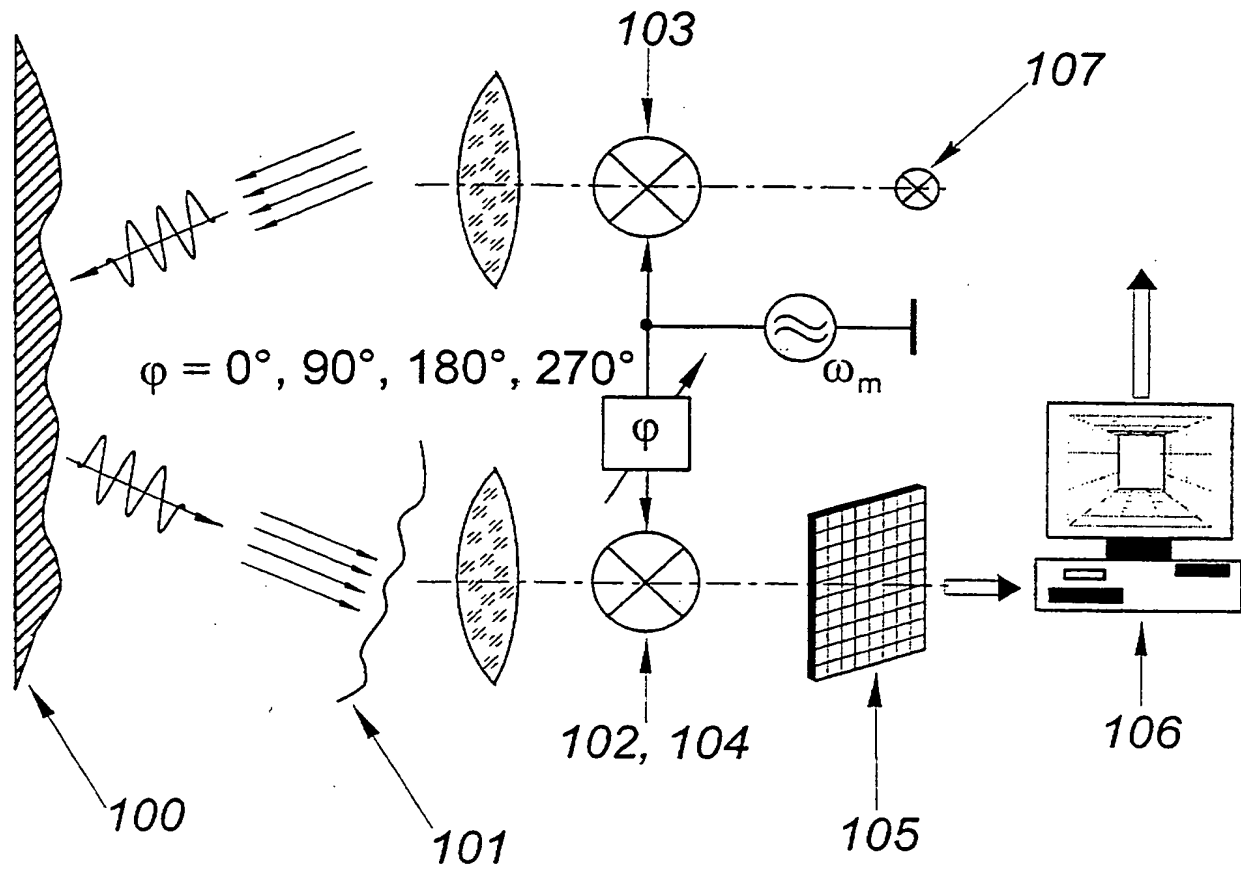


Fig. 10



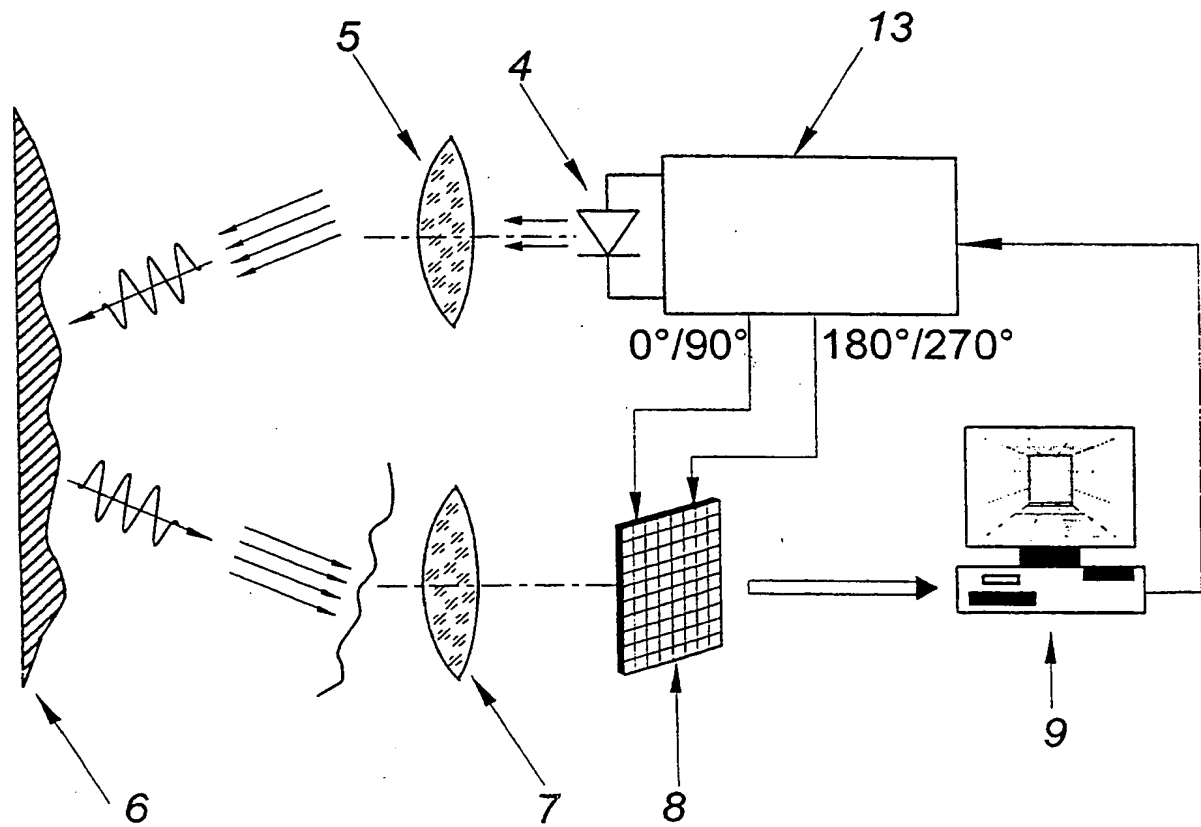


Fig. 11

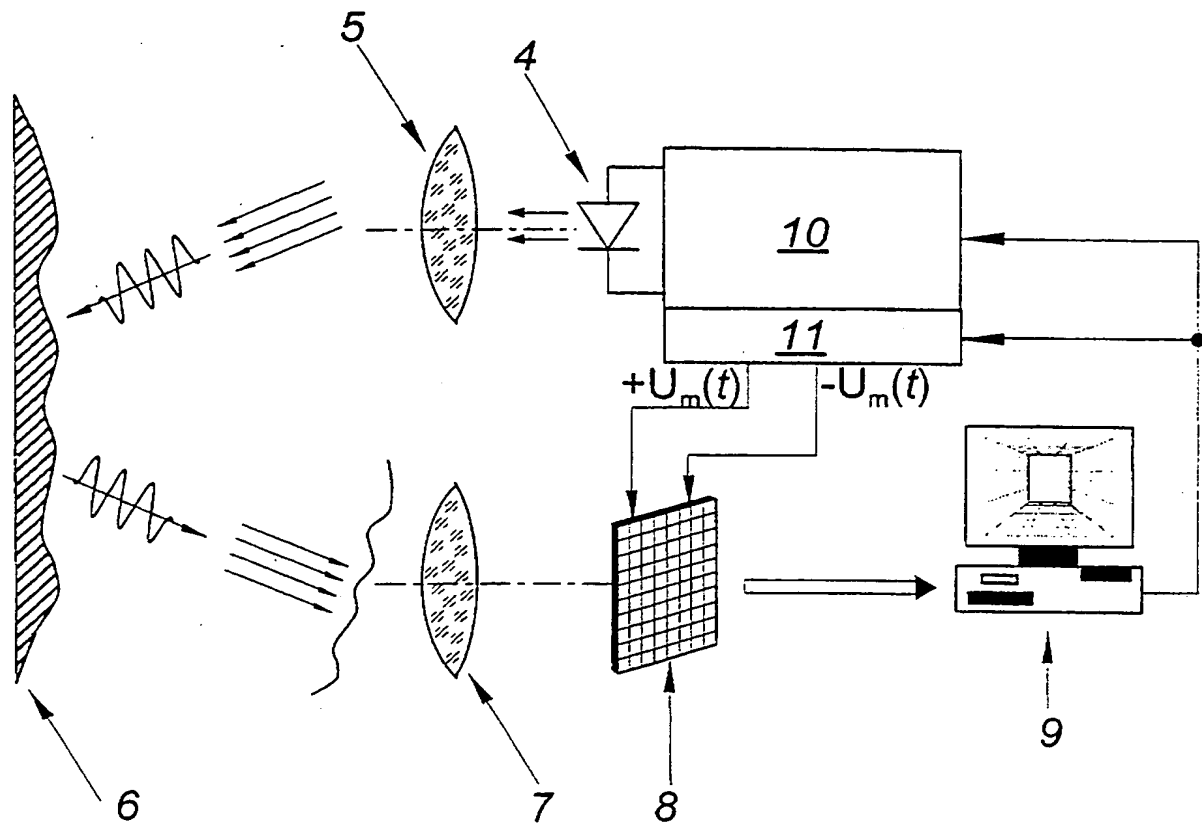


Fig. 12

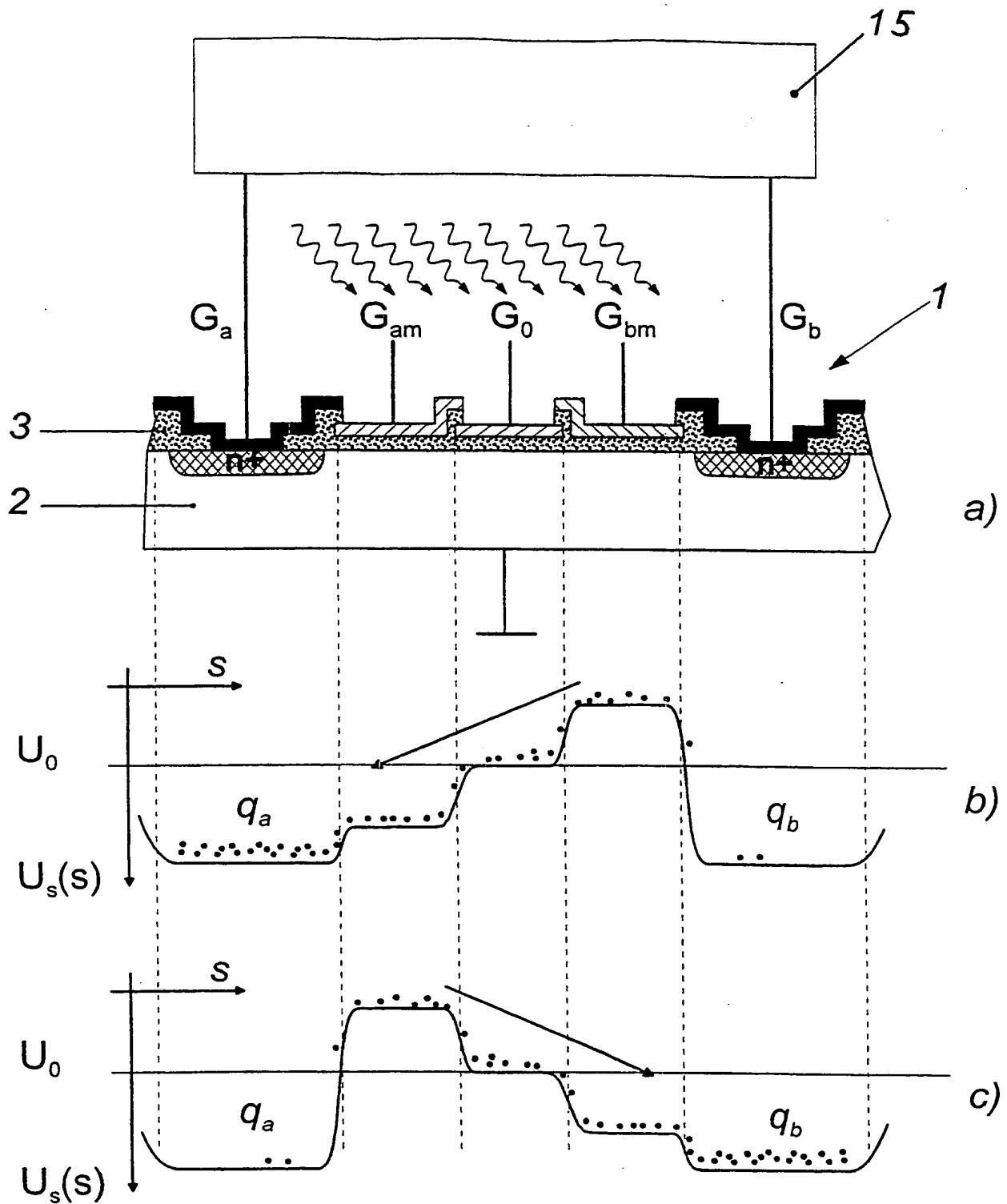


Fig. 13

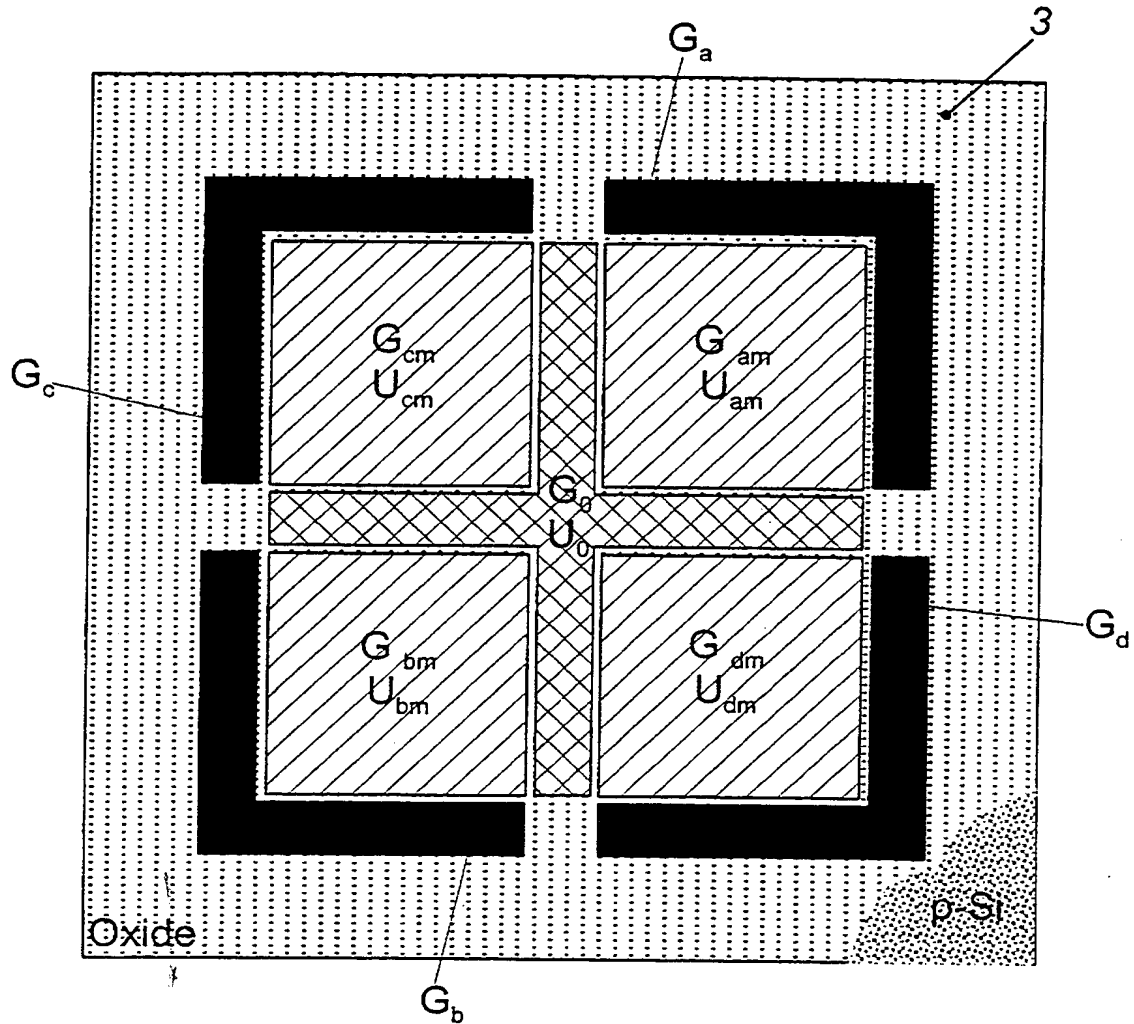


Fig. 14